



LOUVAIN
School of Management

UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN

LOUVAIN SCHOOL OF MANAGEMENT

Modélisation de la structure du réseau financier belge : analyse dynamique

Promotrice : Madame Sophie Béreau

Mémoire-recherche présenté par
Dylan Déom
en vue de l'obtention du titre de
Master en sciences de gestion

ANNEE ACADEMIQUE 2014 -2015

Avant-propos

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

Je remercie, tout d'abord, Madame Sophie Béreau, professeur à l'université catholique de Louvain. En tant que promotrice de mémoire, elle a su me guider et me conseiller afin que je puisse accomplir au mieux ma tâche.

Je tiens, également, à remercier l'ensemble de ma famille pour le soutien qu'ils m'ont procuré dans l'élaboration de mon mémoire et dans l'évolution de mon parcours universitaire.

Table des matières

Introduction	1
Première partie : Revue de littérature.....	3
1. Le marché financier, un système complexe	3
2. Les approches de la complexité.....	3
3. Caractérisation d'un système complexe	5
4. Comportement et structure d'un système complexe.....	7
4.1. La matrice de corrélation	7
5. Les méthodes de modélisation	9
5.1. Techniques de regroupement hiérarchique.....	9
5.2. Théorie de la matrice aléatoire	14
Deuxième partie : Analyse empirique	17
1. Données	17
2. Traitement des données.....	20
2.1. Matrice de corrélation	21
2.2. Matrice d'adjacence et le réseau.....	21
2.3. Le dendrogramme	24
2.4. Minimum spanning tree (MST).....	25
3. Analyse des données	26
3.1. 2000	26
3.2. 2001	30
3.3. 2002	33
3.4. 2003	36
3.5. 2004	37
3.6. 2005	40
3.7. 2006	43
3.8. 2007	45
3.9. 2008	48
3.10. 2009	50
3.11. 2010	53
3.12. 2011	56
3.13. 2012	59

3.14. 2013	62
3.15. 2014	65
4. Analyse générale.....	68
5. Pour aller plus loin.....	71
Conclusion.....	73
Bibliographie.....	75
Annexes	79
1. Figures et tableaux d'analyse	79
2. Code R utilisé.....	97

Introduction

Au jour d'aujourd'hui, alors que les effets des dernières crises économiques et financières se font encore ressentir, il y a un réel besoin d'améliorer notre connaissance et notre compréhension de la structure et de la dynamique sous-jacentes aux marchés financiers. En effet, les importants changements qu'a subi le système financier, ces dernières années, justifient la nécessité d'obtenir de nouvelles perspectives et informations quant à l'étude et à l'analyse de celui-ci. Les récents événements illustrent la complexité à laquelle répondent les marchés financiers et il est devenu évident que de tels systèmes complexes se construisent de plus en plus sur des interdépendances. Celles-ci sont aussi bien comportementales qu'informationnelles.

Ce présent mémoire a pour objectif la modélisation de la structure du réseau financier belge en s'intéressant plus particulièrement aux sociétés composant l'indice boursier belge connu sous le nom de BEL 20. Pour ce faire, cette analyse utilise différentes méthodes présentées dans la littérature. Celles-ci sont sollicitées afin de détecter l'existence de comportements communs entre les rendements journaliers des différents titres composant le marché financier considéré. Les méthodes se basent sur la matrice de corrélation qui joue, entre autres, un rôle important dans les descriptions de la dynamique des prix des actifs.

La première partie de ce travail présente une revue de la littérature qui s'intéresse, dans un premier temps, au large thème de la complexité et à ses différentes approches. Ensuite, l'accent est mis sur les caractéristiques et le comportement des systèmes complexes tels que les marchés financiers. Dans un deuxième temps, une revue des principales méthodes utilisées afin d'analyser le comportement des différents éléments composants un système complexe est effectuée. Celles-ci regroupent, notamment, les techniques de regroupement hiérarchique, comme le minimum spanning tree ou le dendrogramme, ainsi que la théorie de la matrice aléatoire.

Quant à la deuxième partie du mémoire, elle présente, tout d'abord, la méthodologie utilisée afin d'effectuer la récolte et le traitement des données

ainsi que la modélisation des différents réseaux considérés. Ensuite, une analyse détaillée des données pour chaque année considérée sera exposée. Nous terminerons par diverses pistes de réflexion et une conclusion mais auparavant, les observations et constatations, faites au long de l'analyse dynamique, seront développées dans une analyse plus générale.

Première partie : Revue de littérature

1. Le marché financier, un système complexe

En parcourant la littérature, il semble qu'il est difficile de se mettre d'accord sur une définition spécifique du terme « complexité ». Que ce soit à un niveau qualitatif ou quantitatif, le concept reste insaisissable (Cilliers, 1998). Cependant, comme le suggère Rickles (2010), la « complexité » est contenue dans le concept de « système complexe ». Ce dernier peut se définir comme étant : « un tout constitué d'un large nombre de parties qui interagissent dans un sens qui n'est pas simple. Dans de tels systèmes, le tout est plus que la somme de ses parties, non pas dans un sens final ou métaphysique, mais dans l'important sens pragmatique que, étant donné les propriétés des parties et les lois de leurs interactions, déduire les propriétés de l'ensemble n'est pas une simple affaire » [*traduction*] (Simon, 1981, p. 4).

Un grand nombre d'auteurs s'accordent à dire que les marchés financiers peuvent être considérés comme étant des systèmes complexes. Ainsi selon Johnson, Jefferies et Hui : « Les marchés financiers sont des exemples fascinants de la 'complexité en action' : un système complexe réaliste dont l'évolution est dictée par les décisions des foules de traders qui essayent continuellement de gagner dans un vaste 'jeu' global » [*traduction*] (Johnson, Jefferies, & Hui, 2003, para. 1). Mantegna (1999) précise que ces marchés financiers, formant des systèmes complexes bien définis, sont étudiés par des économistes, des mathématiciens et, même par des physiciens.

2. Les approches de la complexité

Il faut savoir qu'en économie et finance il y a deux approches générales de la complexité (Arthur, 1995; Richardson & Zeidan, 2010; Rickles, 2010) : l'éconophysique ainsi que l'éconobiologie. Lorsque la première approche à la volonté d'appliquer la physique des systèmes complexes aux marchés économiques et financiers la deuxième prend ses fondements dans les modèles

de complexité biologique (Richardson & Zeidan, 2010). Toutes deux sont des approches dites « bottom-up » : les propriétés à un niveau macroscopique sont vues comme le résultat d'interactions à un niveau plus microscopique (Rickles, 2010).

Le terme « éconophysique » a été formulé en 1995 par Eugene Stanley et ses chercheurs (Gligor & Ignat, 2001; Richardson & Zeidan, 2010; Rickles, 2010). Arthur (1995) explique que la représentation la plus courante de l'économie est basée sur des éléments physiques. Ainsi, l'approche éconophysique voit l'économie comme un regroupement d'activités, de technologies et de besoins qui vont interagir à travers un système de marché gouverné par des preneurs de décisions comme les entreprises, les banques, les consommateurs ainsi que les investisseurs (Arthur, 1995). Cette vision, qui est plutôt basée sur les interactions, va généralement se reposer sur la physique statistique qui peut être définie comme ceci : « La physique statistique est une structure qui permet aux systèmes qui se composent de beaucoup de particules (probablement hétérogènes) d'être rigoureusement analysés » [*traduction*] (Rickles, 2010, p. 2). En éconophysique les parties seront entre autres les investisseurs, les traders, les consommateurs, etc. (Rickles, 2010). De plus, l'éconophysique est vue comme une réaction révolutionnaire aux standards économiques et menace de renforcer un changement de paradigme. En effet, celle-ci pousse à un changement dans la façon de penser les systèmes et les phénomènes économiques : « La théorie économique néo-classique ne traite pas les systèmes économiques comme des systèmes complexes où le réseau, la structure, l'interaction et l'émergence jouent un rôle explicatif central et où les détails individuels sont largement impertinents. A cause de son évitement à l'importance des problèmes non-individualistes et des interactions, la théorie néo-classique échoue à être empiriquement adéquate » [*traduction*] (Rickles, 2010, p. 14). Il est, aussi, souvent reproché aux théories économiques, dites néo-classiques, d'être trop axiomatiques et formels pour traiter des systèmes complexes ce qui amène les chercheurs à ne pas forcément adhérer aux piliers économiques usuels comme par exemple les attentes rationnelles, l'efficacité de marché ou la notion d'équilibre (Arthur, 1995; Challet, Marsili, & Zhang, 2005).

Arthur (1995), qui se place du côté de l'éconobiologie, à la volonté d'avoir une vision de l'économie et des marchés financiers basée non pas sur des éléments physiques mais sur base d'éléments psychologiques. Ainsi, il représente l'économie comme étant un regroupement de croyances, d'anticipations, d'attentes et d'interprétations qui vont déterminer les actions prises par les preneurs de décisions (Arthur, 1995). Il précise toutefois que les deux visions sont liées car les croyances et attentes sont diffusées et construites par l'économie physique. Lorsque pour l'éconophysique, l'analyse se tourne vers les interactions des agents et les processus d'émergence, l'éconobiologie tente de déterminer les propriétés statistiques des conséquences de ses mêmes interactions entre agents (Richardson & Zeidan, 2010).

3. Caractérisation d'un système complexe

Comme le suggère Cilliers (1998), afin d'obtenir une description d'un système complexe qui n'est pas contrainte par une définition spécifique, il peut être intéressant d'analyser les caractéristiques propres à ce type de système. Dans son article sur la complexité des marchés financiers, Rickles (2010) part du principe raisonnable qu'il existe trois caractéristiques constitutives d'un système complexe. Il explique, également, que ces trois propriétés doivent être comprises comme étant le résultat des propriétés et interactions des sous-unités qui le composent.

Premièrement, un système complexe, formant l'unité, doit contenir plusieurs sous-unités dont le nombre exact reste vague (Rickles, 2010). Cilliers (1998) ajoutera que lorsque le nombre d'éléments composants le système est relativement petit, le comportement de ces éléments pourra être décrit de manière formelle et dans des termes conventionnels (à l'aide d'un système d'équations par exemple). Cependant, lorsque ce nombre de sous-unités devient relativement grand, une description de manière conventionnelle de différents éléments n'est plus atteignable et ne permet plus d'expliquer le système (Cilliers, 1998).

Deuxièmement, être constitué de plusieurs éléments est une condition nécessaire mais pas suffisante afin d'être considéré comme un système complexe. Effectivement, les sous-unités du système influencent et sont influencées par les autres et doivent interagir de manière dynamique (Cilliers, 1998). Ceci nous amène à la seconde caractéristique de Rickles (2010) : les sous-unités qui forment un système complexe doivent être interdépendantes au moins une partie du temps. En plus de contenir des éléments qui interagissent ensemble, un système complexe est souvent un système ouvert qui interagit avec son environnement (Cilliers, 1998).

Troisièmement, Rickles (2010) explique que les interactions entre les sous-unités doivent être non-linéaires au moins une partie du temps. Effectivement, un large système composé d'éléments linéaires pourra souvent être décrit par un système équivalent composé de beaucoup moins d'éléments (Cilliers, 1998). Cilliers (1998) précise que la non-linéarité est une précondition à la complexité et qu'elle permet aux petites causes d'avoir un grand résultat, et vice-versa. Ce même auteur complète cette troisième caractéristique en donnant d'autres propriétés importantes des interactions entre les éléments d'un système complexe :

- Les interactions ne sont pas que physiques et peuvent résulter d'un transfert d'information.
- Elles sont généralement des courtes portées mais peuvent avoir une forte influence.
- Il peut y avoir un effet de boucle dans les interactions. Ainsi, « l'effet de n'importe quelle activité peut être retransmis sur elle, parfois directement, parfois après un certain nombre d'étapes intervenantes. Ce retour peut être positif (amélioration, stimulation) ou négatif (détérioration, inhibant) » [*traduction*] (Cilliers, 1998, p. 4).

4. Comportement et structure d'un système complexe

Selon Tumminello, Lillo, et Mantegna (2007), une analyse empirique des interactions entre les éléments d'un système complexe est fondamentale afin de comprendre les structures collectives et les règles sous-jacentes au comportement d'un tel système. L'étude des systèmes complexes, comme les marchés financiers, produit un type particulier de données, connues sous le nom de données multivariées (Tumminello et al., 2007). Leur analyse permet d'obtenir des informations cruciales dans l'investigation d'une large variété de systèmes (Tumminello, Lillo, & Mantegna, 2010).

La littérature propose plusieurs définitions de l'analyse de données multivariées. Camo, une société pionnière et leader mondiale dans le domaine de l'analyse de telles données, décrit l'analyse multivariée comme étant : « l'investigation de plusieurs variables, simultanément, afin de comprendre les relations qui peuvent exister entre elles. L'analyse multivariée peut être aussi simple en analysant deux variables comme en analysant des millions » [*traduction*] (Camo, 2012, p. 6). Rencher (2003) définit, dans son livre, l'analyse multivariée comme ceci : « l'analyse multivariée consiste à un regroupement de méthodes qui peuvent être utilisées quand plusieurs mesures sont faites sur chaque individu ou objet dans un ou plusieurs échantillons » [*traduction*] (Rencher, 2003, p. 1).

4.1. La matrice de corrélation

D'après Tumminello et al. (2010) les différentes méthodes d'analyse multivariée permettent d'obtenir de l'information sur le nombre de facteurs qui caractérisent la dynamique du système étudié. Elles permettent également de récolter de l'information sur la composition des groupes autour desquels le système s'organise.

Rencher (2003) explique que, habituellement, les variables mesurées par les méthodes d'analyse multivariée sont corrélées. Il ajoute que si cela n'était pas le cas, beaucoup de techniques d'une telle analyse auraient peu d'utilité (Rencher, 2003). Toujours selon Rencher (2003), le but de la plupart de ces approches est

la simplification afin de trier les diverses informations fournies par les variables corrélées et découvrir la structure sous-jacente.

En parcourant la littérature, c'est, pour la grande majorité des cas, l'utilisation de la matrice de corrélation qui est préconisée afin d'étudier et d'analyser l'ensemble des données et des interactions à l'intérieur d'un système complexe comme le marché financier. Effectivement, selon Coronello, Tumminello, Lillo, Micciche, et Mantegna (2007) : « la matrice de corrélation est un des outils les plus utiles afin d'étudier le comportement collectif des systèmes caractérisés par la présence d'un large nombre d'éléments qui interagissent les uns et les autres dans un période donnée de temps » [*traduction*] (Coronello et al., 2007, p. 1). La matrice de corrélation joue déjà un rôle important dans l'optimisation de portefeuille (Markowitz, 1952) ainsi que dans la gestion du risque. Effectivement, pour ce dernier, Laloux, Cizeau, Bouchaud et Potters (1999) expliquent que la probabilité d'enregistrer une grande perte pour un certain portefeuille d'actions dépend de la corrélation des mouvements des différents constituants. La matrice de corrélation est aussi utilisée dans le cadre des descriptions quantitatives de la dynamique des prix des actions dans le marché financier (Mantegna, 1999; Tumminello et al., 2010). Kenett, Tumminello, et al. (2010) précisent que dans une volonté de caractérisation du profil de corrélation, le coefficient de corrélation de Pearson est souvent utilisé afin d'analyser les relations entre différents titres. Dans ce cas précis, celui-ci procure une information sur les similitudes dans les changements de prix entre deux actions (Kenett, Tumminello, et al., 2010).

Il faut savoir que plusieurs remarques sont formulées lorsque la matrice de corrélation est utilisée pour analyser un système. Puisque les conditions de marché peuvent ne pas être stationnaires et les données historiques utilisées sont souvent limitées, il est difficile de déterminer si la corrélation des changements de prix entre deux titres résulte vraiment de l'interaction entre deux compagnies ou est due à du bruit de mesure (Plerou, Gopikrishnan, Rosenow, Amaral, & Stanley, 1999). En effet, la matrice de corrélation est construite sur base d'un nombre fini d'entrées T échantillonnant le comportement des N éléments du système (Tumminello et al., 2010). De par ce

caractère fini de T , l'estimation de la matrice de corrélation présente alors un degré d'incertitude statistique qui peut être caractérisé par des hypothèses statistiques plus larges (Tumminello et al., 2010). C'est d'ailleurs pour cela que certains physiciens, comme Laloux et al. (1999) et Plerou et al. (1999), tentent de palier à cette incertitude statistique de la matrice de corrélation à l'aide de la théorie de la matrice aléatoire (« random matrix theory » en anglais). Ces auteurs défendent le fait que cette théorie apporte un grand intérêt dans la compréhension de la structure de la matrice de corrélation. Néanmoins, comme le précisent Tumminello et al. (2007), dans certains cas il est nécessaire que la longueur des données soit limitée afin d'éviter que des effets non-stationnaires significatifs (des effets qui évoluent avec le temps) amènent des erreurs dans l'estimation des corrélations. La matrice de corrélation pourra, donc, aussi être affectée par du bruit résultant d'erreurs de mesure ou de l'interaction du système avec son environnement (Tumminello et al., 2007). Ce bruit de mesure peut nuire à la compréhension de l'information. Laloux et al. (1999) confirment en expliquant que si on considère N actifs et que la longueur T des N séries temporelles n'est pas assez large comparé à N on peut s'attendre à avoir du bruit dans les mesures des corrélations.

5. Les méthodes de modélisation

La littérature met en avant certaines méthodes afin d'analyser le comportement des différents éléments composants un système complexe tel que le marché financier. Ces comportements peuvent être caractérisés par des données multivariées.

5.1. Techniques de regroupement hiérarchique

Selon Tumminello et al. (2010), la structure hiérarchique des interactions entre les éléments affecte fortement la dynamique des systèmes complexes. Ainsi, pour Anderson (cité par Tumminello et al., 2010), une description quantitative des hiérarchies du système est une étape clé dans la modélisation des systèmes complexes. L'analyse de regroupement (« cluster analysis » en

anglais) rassemble diverses techniques qui ont pour but la découverte de structures à l'intérieur de systèmes complexes (Anderberg, 1973). Elles vont tenter de regrouper les différents éléments du système dans des classes qui sont le plus homogènes possible (Tilière, 2009). Comme l'explique Rencher (2003) « le but est de trouver un groupement optimal où les observations et objets à l'intérieur de chaque groupe sont similaires, mais où les groupes sont différents les uns des autres » [*traduction*] (Rencher, 2003, p. 451). Ces techniques sont utilisées dans nombreux domaines comme par exemple la médecine (psychiatrie, diagnostique clinique, cytologie), les sciences comportementales et sociales (psychologie, sociologie, criminologie, etc.) ainsi que les sciences politiques et de l'information (économie, recherche en marketing, recherche opérationnelle, etc.) (Anderberg, 1973).

Les techniques de regroupement hiérarchique vont plus loin que le simple regroupement d'individus dans des classes homogènes. En effet, elles ont la volonté de les organiser de manière hiérarchique. Afin d'analyser les comportements des différents éléments et de les grouper, les techniques utilisent des indices de similarité ou de proximité (Rencher, 2003). Ainsi, dans certains cas, le coefficient de corrélation entre les paires d'éléments est utilisé comme mesure de similarité et des algorithmes sont appliqués à la matrice de corrélation (Tumminello et al., 2010). Dans d'autres cas, c'est une mesure de distance entre les éléments qui sera utilisée comme mesure de proximité (Rencher, 2003).

Anderberg (1973) expose diverses techniques de regroupement hiérarchique. Cependant, dans la littérature, les méthodes appliquées au marché financier se basent en particulier sur l'analyse de regroupements par lien simple (« simple linkage cluster analysis » en anglais) ou par lien moyen (« average linkage cluster analysis » en anglais). Le résultat de ces techniques est généralement un minimum spanning tree (abrégé par « MST » par la suite) ainsi qu'un dendrogramme ou arbre hiérarchique (Coronnello, Tumminello, Lillo, Micciché, & Mantegna, 2005).

Il faut préciser que les procédures de regroupement hiérarchique consistent en une sélection de l'information statistiquement pertinente de la

matrice de corrélation (Tumminello et al., 2010). Elles sont alors appelées procédures de filtration. Comme l'explique Tumminello et al. (2010), un graphe complet qui lie l'ensemble des éléments composant le système peut s'avérer être trop riche en information au point d'en altérer la lisibilité. Généralement, la complexité d'un système complexe comme le marché financier peut se refléter dans les graphes correspondants. Ceci amène un besoin d'utiliser des méthodes qui vont sélectionner l'information clé en filtrant un tel système complexe (Tumminello, Aste, Di Matteo, & Mantegna, 2005). Ainsi, les procédures de regroupement basées sur la corrélation sont utilisées afin de réduire le nombre de mesures de similarité représentatives de la matrice de corrélation originale (Coronnello et al., 2005).

5.1.1. Minimum spanning tree (MST)

Le MST, traduit par « arbre de chevauchement minimum » en français, est par définition un graphe, sans boucle, connectant n nœuds (ou vertex) avec $n-1$ liens qui sont les plus petits liens parmi tous ceux reliant les nœuds (Coronnello et al., 2005). Dans un tel graphe connecté, la somme des longueurs des liens est minimisée (Mizuno, Takayasu, & Takayasu, 2006). Utiliser le MST dans le cadre de la modélisation du marché financier est intéressant car il permet de faire ressortir les arrangements entre les titres en sélectionnant les connexions les plus pertinentes, et ce, pour chaque élément du système (Mantegna, 1999). Il permet aussi d'analyser quantitativement les propriétés de la matrice de corrélation (Tumminello et al., 2010) et d'en révéler un aspect topologique (Coronnello et al., 2005).

Il faut savoir que le MST utilise, en principe, la méthode de regroupement par lien simple ou algorithme du voisin le plus proche (Coronnello et al., 2005; Naylor, Rose, & Moyle, 2007). Cette technique de regroupement hiérarchique a été introduite dans la finance par Mantegna (1999) afin de répondre à un besoin identifié lors de la modélisation des marchés financiers. Avec la méthode de regroupement par lien simple, la distance entre deux regroupements A et B est définie comme étant la distance minimum entre un point dans A et un point dans B (Rencher, 2003).

Ainsi,

$$D(A, B) = \min\{d(i, j), \text{ pour } i \text{ dans } A \text{ et } j \text{ dans } B\}$$

Où $d(i, j)$ est la distance Euclidienne ou toutes autres distances entre i et j . Cependant, il faut noter que pour travailler avec une mesure de similarité, comme le coefficient de corrélation par exemple, la recherche de la distance minimum peut être remplacée par celle de la corrélation maximum (Coronnello et al., 2005). Mantegna et Stanley (1999) proposent dans leur livre une mesure de la distance entre deux titres qui répond aux trois axiomes d'une distance Euclidienne. Ils (Mantegna & Stanley, 1999) définissent une métrique en utilisant comme distance $d(i, j)$ une fonction du coefficient de corrélation du changement du prix (en logarithme) entre deux titres notée ρ_{ij} :

$$d(i, j) = \sqrt{2 (1 - \rho_{ij})}$$

Afin de construire un MST, plusieurs auteurs comme Korte et Vygen (2002) et West (2001) suggèrent d'utiliser l'algorithme de Kruskal. Coronnello et al. (2005) appliquent, dans leur article, cet algorithme à une matrice de distance qui permet d'obtenir un MST basé sur la méthode de regroupement simple :

1. Construire une liste ordonnée des paires d'actifs L_{ord} en les classant par ordre croissant de distance $d(i, j)$.
2. La première paire de L_{ord} donne les deux premiers éléments du MST et le lien entre eux.
3. La construction du MST continue par l'analyse de la liste L_{ord} . A chaque étape successive, une paire d'éléments est sélectionnée dans la liste et le lien correspondant est ajouté au MST seulement si aucune boucle n'est générée dans le graphe après l'ajout du lien.

Le résultat de cet algorithme sera un graphe composé de n nœuds et $n-1$ liens.

5.1.2. Dendrogramme

Le dendrogramme ou l'arbre hiérarchique est une autre technique d'analyse des regroupements hiérarchiques. En effet, d'après Naylor et al. (2007), il aide à la détermination des structures hiérarchiques d'un réseau et est particulièrement utile pour déterminer si des groupements existent. Le dendrogramme est un outil de représentation graphique qui va permettre de classer les individus de manière ascendante et hiérarchique (Benzécri, 1985). Ceci pour permettre, par exemple, de révéler un aspect taxinomique de la matrice de corrélation (Coronnello et al., 2005). Ascendante dans le sens où, à partir des individus, des groupes vont être constitués en fonction des ressemblances et des plus petites distances afin d'aboutir à un seul groupe qui contient toutes les observations (Belhedi, s.d.). Ainsi, chaque individu est, dans un premier temps, assigné à son propre regroupement. Ensuite, à chaque étape et de manière itérative, les deux regroupements les plus similaires sont joints jusqu'à obtenir un simple regroupement de tous les individus.

Mantegna (1999) explique dans son article que la connaissance d'un MST (voir ci-dessus) permet d'obtenir d'une façon directe et simple un arbre hiérarchique où les différents individus sont reliés par des branches se raccordant entre elles par des nœuds. Pour cela, il faut introduire la notion de distance ultramétrique sous-dominante (Rammal, Toulouse, & Virasoro, 1986). Celle-ci, notée $d^<(i, j)$ entre i et j , est la distance Euclidienne maximum $d(k, l)$ détectée simplement en se déplaçant de i à j par le chemin le plus court dans le MST (Mantegna, 1999). Cette distance $d^<(i, j)$ satisfait les trois axiomes d'une distance Euclidienne ainsi que l'inégalité ultramétrique suivante (Rammal et al., 1986):

$$d^<(i, j) \leq \max (d^<(i, k), d^<(k, j))$$

Une matrice des distances ultramétriques sous-dominantes est obtenue et permet de dresser un arbre hiérarchique. Il est à noter qu'un tel arbre peut être obtenu suivant l'utilisation de l'analyse de regroupement par lien simple ou par lien moyen (Coronnello et al., 2005). Différents résultats pourront donc ressortir suivant le choix de la méthode d'analyse.

5.1.3. Planar maximally filtered graph

Le planar maximally filtered graph (PMFG) a été introduit par Tumminello et al. (2005) afin d'obtenir un graphe qui conserve les mêmes propriétés que le MST mais qui permet un nombre plus grand de liens et une structure topologique plus complexe que le MST (Coronnello et al., 2005). En effet, ce graphe est une extension du MST où la contrainte de ne pas avoir de boucle est supprimée. Il a la particularité d'être un graphe planaire et donc de pouvoir être représenté sur un plan sans qu'aucun lien n'en croise un autre (West, 2001).

Comme le montre Tumminello et al. (2005), lors de la construction du PMFG et du MST, si deux éléments sont connectés par au moins un lien dans un des graphes considérés, il l'est aussi dans l'autre. Ceci permet de constater qu'un MST est toujours compris dans un PMFG (Coronnello et al., 2005). Malgré le fait que le PMFG fait ressortir plus d'information à propos du système, Tumminello et al. (2005) prouvent dans leur article que la stabilité vis à vis de l'incertitude statistique a tendance à être légèrement supérieure dans un MST. Ils rappellent que cette incertitude statistique résulte du fait de la longueur finie des séries temporelles, représentatives du système, qui ont été investiguées.

5.2. Théorie de la matrice aléatoire

La théorie de la matrice aléatoire (« random matrix theory » en anglais) est une autre méthode qui permet d'analyser le comportement des éléments d'un système complexe. Il faut savoir que cette théorie a, initialement, été introduite dans le cadre de la physique nucléaire et ce afin de comprendre le comportement statistique des résonances des neutrons lents (Mehta, 2004). Elle s'est ensuite étendue à de nombreux autres domaines.

Dans le contexte de la gestion d'un portefeuille de titres, cette théorie va être utile afin d'investiguer les valeurs propres principales de la matrice de corrélation et d'identifier les forces clés qui influencent le marché (Kenett, Shapira, et al., 2010). Elle permet de sélectionner les valeurs et vecteurs propres de la matrice de corrélation les moins affectés par l'incertitude statistique et

comme expliqué auparavant, de quantifier l'effet de cette incertitude statistique (Coronnello et al., 2005). Des chercheurs comme Laloux et al. (1999); Plerou et al. (1999) découvrent que la plupart des valeurs propres dans le spectre de la matrice de corrélation empirique correspondent avec les prédictions théoriques de la matrice aléatoire faites à travers la fonction de densité spectrale considérée. De plus, ils prouvent que les plus grandes valeurs propres sont incompatibles avec cette fonction de densité et décrivent, alors, le comportement commun des titres composants le portefeuille (Coronnello et al., 2005). Pour Laloux et al. (1999) les plus grandes valeurs propres et leurs vecteurs sont porteurs d'information pertinente tandis que les plus petites valeurs propres sont dominées par du bruit et donc aléatoires. Ceci va remettre en question le schéma de l'optimisation de portefeuille de Markowitz (Markowitz, 1952) basé sur une détermination purement historique de la matrice de corrélation. Ils vont plus loin en affirmant que la partie de la matrice de corrélation qui est orthogonale à la plus grande valeur propre est purement aléatoire. La théorie de la matrice aléatoire permet alors de détecter la partie de la matrice de corrélation qui contient de l'information économique (Coronnello et al., 2005).

Deuxième partie : Analyse empirique

1. Données

Afin d'obtenir un échantillon de données suffisamment représentatif du marché financier belge, il semble intéressant de s'intéresser aux sociétés actuellement sous-jacentes au BEL 20. En effet, le BEL 20 est l'indice boursier de référence de la bourse de Bruxelles en Belgique et est composé des 20 plus grandes sociétés, en principe belges, cotées sur NYSE-Euronext. Ce dernier est un marché boursier qui regroupe les plus grandes bourses mondiales comme la bourse d'Amsterdam, de Bruxelles, de Paris ou encore celle de New-York. Il est à noter que la composition du BEL 20 est révisée une fois par an, au mois de mars et qu'il faut respecter deux critères afin de pouvoir intégrer le BEL 20. Premièrement, il faut que plus d'un tiers du capital flottant de l'entreprise (celui réellement coté en bourse) soit en mouvement et change de main sur une période donnée. Deuxièmement, la société doit disposer d'une capitalisation boursière d'au moins 300 000 fois la valeur de l'indice. Pour avoir un ordre de grandeur, ceci équivaut actuellement à un peu plus d'un milliard d'euros. Cette dernière condition est assouplie lorsque l'entreprise fait déjà partie de l'indice et qu'elle veut conserver sa place puisque la capitalisation boursière minimale s'élève à 200 000 fois le niveau du BEL 20.

La difficulté dans la récolte et l'extraction de données a été de trouver une base de données fiable et complète. Dans un premier temps, c'est vers Yahoo!Finance que je me suis tourné mais il s'est vite avéré qu'une partie des données n'était pas disponible et que la récolte était lente et laborieuse. Ensuite, j'ai découvert Macrobond qui est une puissante plateforme de recherche et d'analyse des données économiques et financières. L'accès à cette base de données, qui est onéreux et réservé aux grandes entreprises, est proposé sur quelques ordinateurs par l'Université Catholique de Louvain.

Cette analyse porte sur une période qui s'étend sur 15 années, à savoir de janvier 2000 à décembre 2014. Le choix de cette période assez large est réalisé

dans le but de capturer un grand nombre d'information et de pouvoir avoir une analyse dynamique pertinente. Après un temps de familiarisation avec le programme de base de données complexe, les prix journaliers à la fermeture des 20 sociétés intégrant le BEL 20 sur la période cible de 15 ans ont alors pu être extraites. Ceci constitue un échantillon assez conséquent composé de 3.838 observations pour chaque entreprise considérée. Ces observations sont regroupées dans 20 séries temporelles distinctes représentatives des 20 sociétés.

Puisque cette analyse porte sur l'étude des connexions entre les différentes sociétés formant un réseau et sur l'observation des groupements qui peuvent être constitués, il peut être pertinent de décrire brièvement l'ensemble des sociétés considérées. Effectivement, avoir une connaissance de l'industrie, du secteur d'activité et de la capitalisation boursière de chaque entreprise peut contribuer à la compréhension des différents réseaux obtenus. L'industrie et le secteur d'activité proviennent du système de classification « Industry Classification Benchmark » (ICB) développé par l'indice Dow Jones et le FTSE. Celui-ci est couramment utilisé par les investisseurs puisqu'il intègre un nombre considérable de sociétés (plus de 70.000) et de titres (plus de 75.000) à travers le monde et qu'il permet de segmenter le marché en diverses catégories.

Nom de la société	Industrie	Secteur d'activité	Capitalisation boursière (en million d'euros)
Ab Inbev	Biens de consommation	Boissons	186.958
Ackermans Van Haaren	Finance	Services financiers	4.644
Ageas (ex Fortis)	Finance	Assurances vie	8.229
Befimmo	Finance	Immobilier	1.335
Bekaert	Industriel	Industrie générale	1.538

Cofinimmo	Finance	Immobilier	2.003
Colruyt	Service aux consommateurs	Vente au détail et distribution alimentaire	6.852
Delhaize	Service aux consommateurs	Vente au détail et distribution alimentaire	8.267
D'Ieteren	Service aux consommateurs	Détaillants généraux	1.801
GBL	Finance	Services financiers	12.318
KBC	Finance	Banques	26.934
Solvay	Matériaux de base	Industrie chimique	10.829
UCB	Santé	Produits pharmaceutiques	13.800
Umicore	Matériaux de base	Industrie chimique	4.567
Proximus	Service aux consommateurs	Télécommunications	11.550
Elia	Service aux collectivités	Electricité	2.328
Engie (ex GDF Suez)	Service aux collectivités	Gaz, eau et services multiples	42.605
Telenet	Service au consommateur	Média	5.958
Delta Lloyd	Finance	Assurances vie	3.579
Bpost	Industriel	Transports industriels	5.156

2. Traitement des données

Afin de traiter les données extraites de Macrobond j'ai, dans un premier temps, utilisé Excel, le tableur de la suite Office afin de créer un tableau composé de 20 colonnes et de 3.838 lignes. Chaque colonne représente une société avec pour lignes les différentes observations journalières qui s'y attachent.

Ayant les prix journaliers à la fermeture pour chaque entreprise, le changement de prix journalier a pu être calculé de manière assez simple à l'aide d'Excel. Notons P_i le prix journalier à la fermeture pour le titre i au temps t . Alors, le changement de prix journalier S_i est :

$$S_i = \ln P_i(t) - \ln P_i(t - 1)$$

Il est à préciser que le logarithme népérien a été utilisé afin de calculer le rendement journalier.

Dans un second temps, c'est le programme de mathématiques et de statistiques R (avec l'interface R Studio) qui a été utilisé afin de poursuivre le traitement des données récoltées. Pour être importé dans R, le tableau composé des rendements journaliers pour les 20 sociétés obtenu dans Excel a été converti en format texte avec des tabulations comme séparateur. Ceci fait, un tableau assez similaire à celui réalisé dans Excel a pu être obtenu dans R. Afin d'effectuer une analyse dynamique et de partager le tableau reprenant l'entièreté des observations de la période d'analyse de 15 ans, 15 tableaux ont été créés. Chaque tableau représente une année d'analyse pour les 20 sociétés. Ainsi, le tableau 1 reprenait les observations du 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2000, le tableau 2 les observations du 1^{er} janvier 2001 au 31 décembre 2001 et ainsi de suite jusqu'au 31 décembre 2014. Le nombre d'observations pour chaque entreprise varie de 252 à 263 données d'une année à l'autre.

2.1. Matrice de corrélation

A l'aide de R, une matrice de corrélation entre les changements de prix journaliers pour chaque paire d'actifs et année considérée a été générée. C'est entre autres la fonction `cor()` dans R qui permet de calculer les corrélations entre les paires d'actifs. Il est à noter ici que les 15 matrices de corrélation n'ont pas toutes la même dimension car certaines sociétés intègrent le BEL 20 à une date ultérieure à la première date d'analyse, en l'occurrence le 1^{er} janvier 2000. Suivant la méthode de Pearson, le coefficient de corrélation entre l'évolution temporelle du rendement journalier de deux titres est calculé de la manière suivante :

$$\rho_{ij} = \frac{\langle S_i S_j \rangle - \langle S_i \rangle \langle S_j \rangle}{\sqrt{(\langle S_i^2 \rangle - \langle S_i \rangle^2)(\langle S_j^2 \rangle - \langle S_j \rangle^2)}}$$

où i et j sont les noms des titres, S_i est tel que calculé plus haut et $\langle S_i \rangle$ représente la moyenne statistique des S_i sur une période donnée. Il faut savoir que chaque matrice de corrélation est caractérisée par $n(n - 1)/2$ coefficients de corrélation ρ_{ij} différents. Par définition, ρ_{ij} peut prendre des valeurs entre -1 et 1. Un coefficient de corrélation égal à -1 signifie que la paire d'actifs est complètement anti-corrélée tandis qu'un coefficient égal à 1 indique que deux actifs sont complètement corrélés. Ces 15 matrices de corrélation sont importantes car elles forment la base des outils d'analyse utilisés par la suite.

2.2. Matrice d'adjacence et le réseau

Il est possible de tester la significativité des corrélations entre les paires d'actifs grâce au logiciel R et à la notion de p-valeur. Effectivement, un test de corrélation, qui peut être obtenu en utilisant la fonction `cor.test()` ou `rcorr()` dans R, teste si la corrélation entre deux actifs est égale à 0 (hypothèse nulle H_0) ou non (hypothèse alternative H_1). Pour cette analyse, la fonction `rcorr()` est préférée car elle permet de sortir directement le test pour l'ensemble des paires d'actifs en une et une seule matrice.

L'outil qui permet de mesurer la crédibilité de H_0 relativement aux données observées est la p-valeur. Ainsi si la p-valeur est supérieure au seuil de 5 %, l'hypothèse nulle n'est pas rejetée et nous ne pouvons pas conclure sur la significativité de la corrélation. Dans ce cas, il est préférable de ne pas considérer cette corrélation pour cette année d'analyse. Cependant, si la p-valeur est inférieure à 5 %, l'hypothèse nulle que la corrélation est égale à 0 est rejetée et nous pouvons conclure qu'elle existe et est bien différente de 0.

L'utilisation de la p-valeur permet, in fine, d'obtenir une matrice d'adjacence formée de 0 et de 1 en fonction du rejet ou non de l'hypothèse nulle. Ainsi, le rejet de H_0 (existence d'une corrélation) est traduit par le chiffre 1 dans la matrice d'adjacence, alors qu'un non-rejet de H_0 est quant à lui traduit par le chiffre 0. Cette matrice d'adjacence permet de créer un réseau entre les différentes sociétés. Effectivement, grâce à la fonction `igraph()` dans R, un réseau reliant ou non les titres peut être généré et ensuite représenté de manière visuelle à l'aide de la fonction `plot()`. Les entreprises formant le réseau sont symbolisées par les différents nœuds du réseau et ceux-ci peuvent être reliés par des liens. Il faut préciser que l'existence d'un lien reliant deux nœuds dépend de l'existence d'une corrélation entre les deux actifs.

Outre la représentation graphique de ce réseau, un certain nombre d'éléments d'analyse et de mesures supplémentaires peuvent être récupérés.

Tout d'abord, il est intéressant d'analyser le degré de chaque nœud ou société. En fait, celui-ci détermine le nombre de liens qui aboutissent et partent d'un nœud. Sans oublier le fait qu'un lien signifie qu'il existe une corrélation, un grand nombre de degrés pour un certain nœud suppose que celui-ci est fortement connecté aux autres nœuds et au réseau. Au contraire, un faible degré est révélateur d'une faible connexion. Les nœuds ayant un degré nul ne sont bien évidemment pas connectés aux autres nœuds. Il est à préciser qu'une entreprise connectée à une autre totalisera 2 degrés. Effectivement, les degrés prennent en compte les connexions entrantes et les connexions sortantes. En d'autres termes, un degré de 2 signifie qu'il y a corrélation de A avec B mais aussi de B avec A. Ensuite, la somme de l'ensemble des degrés permet d'avoir une idée de l'ampleur

de la connectivité totale du réseau pour l'année d'études considérée. Enfin, il est intéressant et pertinent dans le cadre de cette analyse d'effectuer une comparaison du nombre de degrés total pour les 15 années d'études afin d'obtenir une vision de l'évolution au cours du temps.

Par ailleurs, afin d'obtenir une représentation plus visuelle des degrés du réseau et faire apparaître leur distribution, il peut être intéressant de les présenter sous forme d'un histogramme pour chaque année considérée. Ainsi, il est plus facilement possible de se rendre compte de la répartition du nombre de degrés parmi les différents nœuds car une fréquence leur sera assignée.

Pour terminer avec le réseau découlant de la matrice d'adjacence, une dernière mesure peut être utile : la mesure de la centralité des nœuds. Celle-ci permet d'identifier les nœuds les plus importants du réseau en s'intéressant à différents critères afin d'indiquer la place qu'occupe un nœud par rapport aux autres formant le réseau. Malgré le fait que plusieurs mesures de centralité existent, deux mesures vont être privilégiées dans cette analyse.

En premier lieu, il est intéressant d'analyser la mesure de centralité de vecteur propre (« eigen-vector centrality » en anglais) qui est une mesure de centralité de voisinage directe. Proposée par Bonacich (2007), elle mesure la manière dont un nœud est connecté aux autres nœuds qui sont fortement connectés dans le réseau. Avec cette mesure, plus d'importance sera donnée aux liens avec un nœud très connecté qu'aux liens avec un nœud faiblement connecté. Ainsi, un nœud central sera un nœud connecté aux nœuds les plus puissants. En d'autres mots, la centralité d'un nœud va dépendre de la centralité du nœud auquel il est directement relié. Cette centralité peut être calculée dans R à l'aide de la fonction `evcent()`.

En second lieu, il est possible d'obtenir une mesure de centralité dite d'intermédiarité (« betweenness centrality » en anglais). Selon Freeman (1979), la centralité d'intermédiarité mesure le nombre de fois où un nœud est l'intermédiaire, sur le plus court chemin, entre deux autres nœuds. Ainsi, cette mesure s'intéresse au nombre de plus court chemin passant par un nœud et reliant les autres. Il faut noter qu'ici, l'ensemble des nœuds du réseau sont pris

en compte. Cependant, il est possible qu'un nœud ayant un faible degré ait un grand niveau de centralité d'intermédiarité puisque le niveau de centralité d'intermédiarité n'est pas forcément corrélé au nombre de degré du nœud. Cette mesure de centralité d'un nœud est utile dans l'appréciation du contrôle qu'un nœud exerce sur les interactions des autres nœuds composant le réseau. C'est la fonction `betweenness()` dans R qui permet d'obtenir cette mesure de centralité à partir du réseau considéré.

2.3. Le dendrogramme

Afin de pouvoir analyser un autre réseau, un dendrogramme ou arbre hiérarchique est réalisé. La première étape dans la construction de celui-ci est de transformer les 15 matrices de corrélations couvrantes la période d'analyse en 15 matrices de distance. La fonction de distance utilisée dans cette analyse est celle proposée par Mantegna (1999). Celle-ci permet de répondre aux trois axiomes d'une distance Euclidienne et est définie comme ceci :

$$d(i, j) = \sqrt{2(1 - \rho_{ij})}$$

où ρ_{ij} est le coefficient de corrélation tel que calculé plus haut.

Une fois la matrice de proximité obtenue pour chaque année, un dendrogramme peut être réalisé de manière assez directe en utilisant la fonction `hclust()` et représenté de manière visuelle à l'aide de la fonction `plot()` dans R. La fonction `hclust()` transforme d'elle-même les distances obtenues auparavant en distances ultramétriques afin de joindre les groupements. Il faut cependant préciser quelle méthode la fonction `hclust()` doit prendre en compte afin d'obtenir le dendrogramme souhaité. Dans cette analyse, c'est la méthode «single» qui est privilégiée afin de contraindre la fonction à utiliser l'algorithme de regroupement par lien simple ou du voisin le plus proche. Ce dernier est expliqué plus en détails dans la partie une de ce travail. Un arbre classant les sociétés de manière ascendante et hiérarchique peut ainsi être obtenu afin d'être analysé. De plus, les groupements entre les sociétés peuvent apparaître.

2.4. Minimum spanning tree (MST)

Les 15 matrices de distance utilisées afin de construire un dendrogramme pour chaque année considérée permettent également d'obtenir un MST. Celui-ci offre la possibilité de faire ressortir un nouveau réseau sous une forme qui diffère de celles proposées par les deux réseaux vus précédemment. Effectivement, le MST prend l'aspect d'un graphe connecté reliant l'ensemble des sociétés par le lien le plus court en sélectionnant les connexions les plus pertinentes. La fonction `spantree()` associée à la fonction `plot()` dans R représente visuellement le MST désiré. `Spantree()` utilise l'algorithme de regroupement par lien simple, également utilisé pour la construction du dendrogramme ci-avant, ainsi que l'algorithme de Kruskal afin d'obtenir le réseau sous forme d'un MST. La marche à suivre afin d'obtenir un tel graphe en utilisant l'algorithme de Kruskal est également détaillé dans la partie théorique ci-avant.

Il est nécessaire de préciser que le code R que j'ai réalisé et qui m'a permis d'obtenir les différents réseaux et chiffres à analyser se trouve à la fin de ce travail.

3. Analyse des données

Cette analyse des données et des réseaux extraits du programme R est effectuée sur une période de 15 ans, à savoir de janvier 2000 à décembre 2014.

3.1. 2000

Dans un premier temps, il est intéressant d'analyser le réseau de l'année 2000 dans son ensemble. Celui-ci est présenté ci-dessous, sur la figure 1, et est composé de 14 sociétés. D'après l'évolution du nombre total de degrés au cours de la période d'analyse (figure en annexe 1), ce réseau a le plus faible nombre de degrés total comparé aux autres années composées également de 14 entreprises (2001, 2002 et 2003). De plus, on remarque qu'Ab Inbev et Cofinimmo sont tous deux déconnectés des 12 autres entreprises formant le réseau ce qui signifie que leur corrélation n'est pas significative. Nous pouvons, alors, supposer que leurs rendements journaliers n'évoluent pas avec les rendements des autres sociétés pour cette année d'analyse. Néanmoins, il faut préciser que l'entrée en bourse d'Ab inbev n'a eu lieu que fin de l'année 2000.

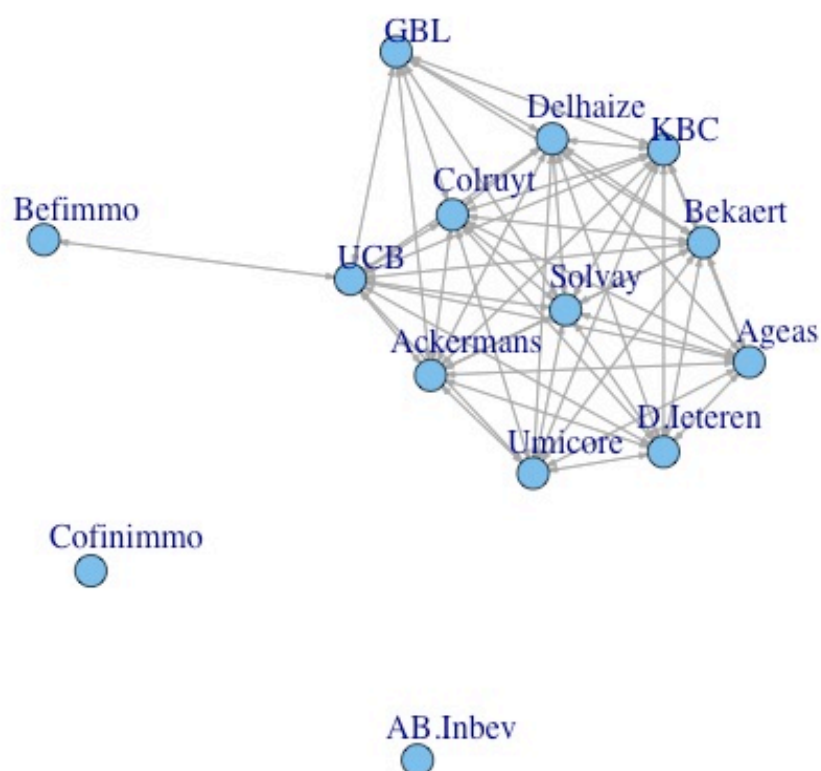


Figure 1 : Réseau 2000

Ensuite, plusieurs éléments d'analyse peuvent être retirés de ce réseau. Effectivement, comme on peut le voir dans le tableau en annexe 2, le degré moyen des nœuds du réseau s'élève à 15. Ceci confirme la faible connectivité du réseau sachant que le degré maximum qu'un nœud pourrait avoir s'il était connecté à l'ensemble des autres sociétés est de 26. Il est évident que le degré d'AB Inbev et de Cofinimmo soit nul puisque que, comme expliqué ci-avant, ces deux sociétés ne sont pas connectées au réseau. Lorsque les autres nœuds ont un nombre de degrés variant de 14 pour GBL à 22 pour UCB, Befimmo n'a qu'un degré de connexion qui s'élève à 2. Ceci est faible comparé aux autres sociétés connectées au réseau. Il est intéressant de mettre l'accent sur le fait que deux des trois entreprises ayant le moins de degrés, à savoir Befimmo et Cofinimmo, font partie du secteur d'activité de l'immobilier. Avec 22 degrés de connexion, c'est la société de produits pharmaceutiques UCB qui a le nombre de degrés le plus élevé et qui est, donc, la plus connectées au réseau. Elle est reliée à toutes les entreprises formant le réseau hormis Ab Inbev et Cofinimmo qui sont complètement déconnectés.

L'analyse de la distribution des degrés du réseau (voir figure en annexe 3) permet d'avoir une vision plus globale des chiffres présentés précédemment et de confirmer les observations faites. Effectivement, on remarque que la plupart des sociétés (11 sur 14) ont un degré de connectivité qui s'étend de 15 à 20 tandis que les trois entreprises restantes se partagent la tranche de 0 à 5 degrés.

En outre, le fait qu'UCB soit la société la plus connectée au réseau, on remarque, sur le tableau en annexe 2, qu'elle est numéro un dans le classement de la centralité d'intermédiation ainsi que dans celui de la centralité de vecteur propre. En ce qui concerne la première mesure de centralité, UCB est largement au-dessus des autres. Ceci signifie qu'UCB occupe une place importante au sein du réseau car elle est l'intermédiaire entre plusieurs autres nœuds. D'ailleurs, il est à préciser que c'est la seule entreprise à être connectée à Befimmo. Pour ce qui est de la mesure de centralité de vecteur propre, UCB détient la centralité la plus haute sans avoir un écart très prononcé comparé aux autres entreprises. En effet, comme on peut le constater, la majorité des entreprises sont connectées et

ont une centralité assez proche. Cependant, ce n'est pas le cas pour Ab Inbev et Cofinimmo qui ont une centralité de vecteur propre de 0 ou proche de 0.

Dans un deuxième temps, le dendrogramme (voir figure 2 ci-dessous) ainsi que le MST (voir figure 3 ci-dessous) pour l'année d'étude 2000 nous amènent plusieurs informations intéressantes que ce soit sur les connexions ou les groupements entre les entreprises considérées.

Nous remarquons directement, que les deux réseaux sont assez similaires. Par exemple, on peut voir sur le dendrogramme que le premier groupe connecté est composé des trois sociétés KBC, UCB et Ageas qui sont également les trois entreprises les plus proches sur le MST. Il est intéressant de constater que KBC et Ageas font partie de la même industrie (la finance). Nous remarquons, également, que plusieurs entreprises directement reliées sur le MST font partie de la même industrie. Effectivement, Colruyt, Delhaize ainsi que D'Ieteren sont directement liés et font partie de l'industrie du service aux consommateurs. C'est le même cas pour Ageas, GBL et KBC faisant partie de l'industrie de la finance. Malgré le fait que le dendrogramme et le MST ne soient pas basés directement sur le coefficient de corrélation comme le premier réseau, un lien ressort. Effectivement, on s'aperçoit que les trois sociétés qui sont le moins connectées sur le réseau basé sur les corrélations pures (Ab Inbev, Befimmo et Cofinimmo) sont celles qui seront connectées en dernières positions sur les deux autres graphes.

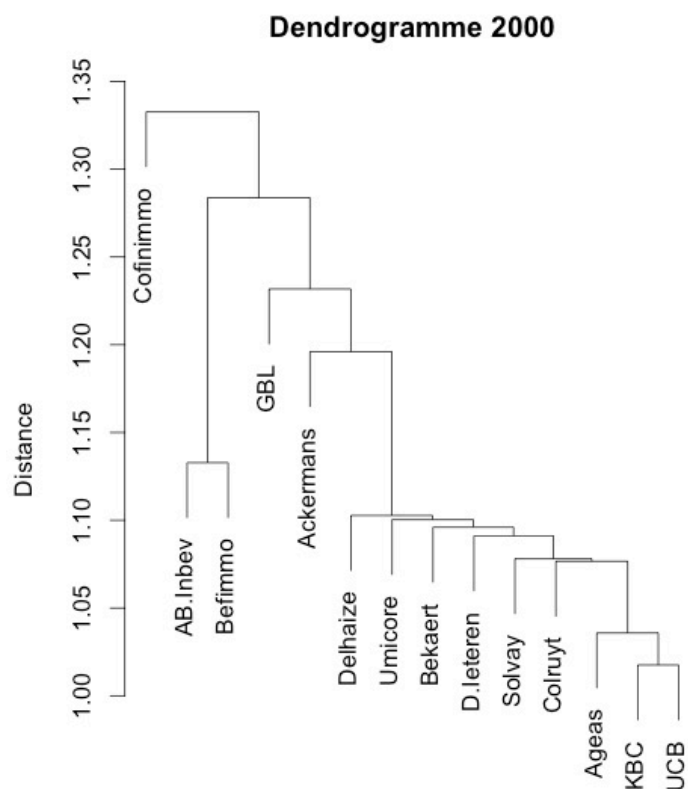


Figure 2 : Dendrogramme 2000

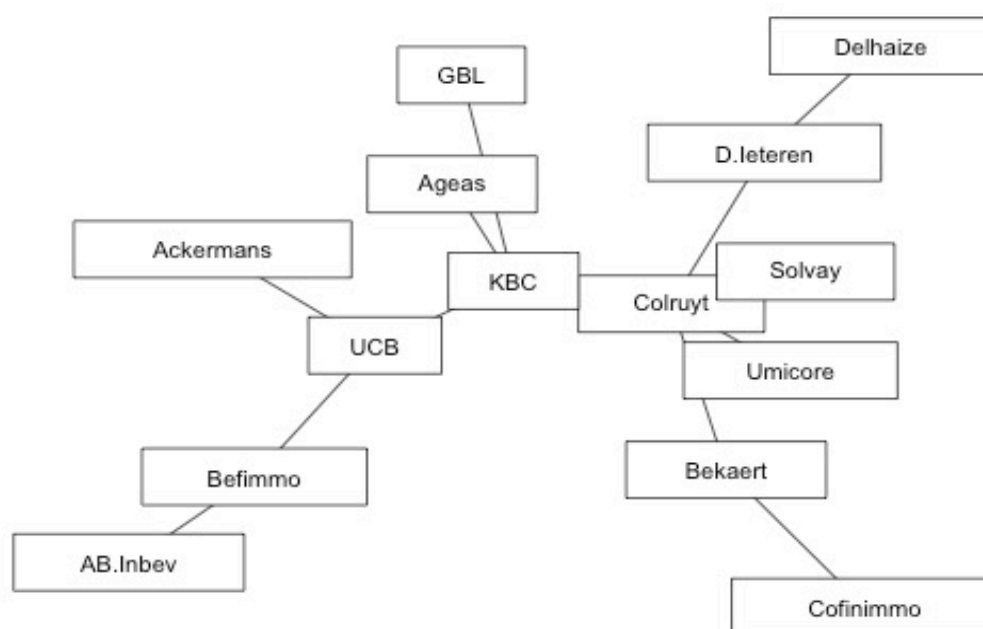


Figure 3 : Minimal spanning tree 2000

3.2. 2001

Premièrement, au vu du réseau de l'année 2001, présenté à la figure 4 ci-dessous, on remarque que celui-ci est légèrement plus connecté que le réseau obtenu pour l'année d'analyse 2000. Ceci est confirmé par le tableau en annexe 4 qui affiche un nombre de degré total de 232 contre 212 en 2000. On peut aussi s'apercevoir que lorsque que Cofinimmo reste complètement déconnecté du réseau, Befimmo s'y connecte pour cette année.

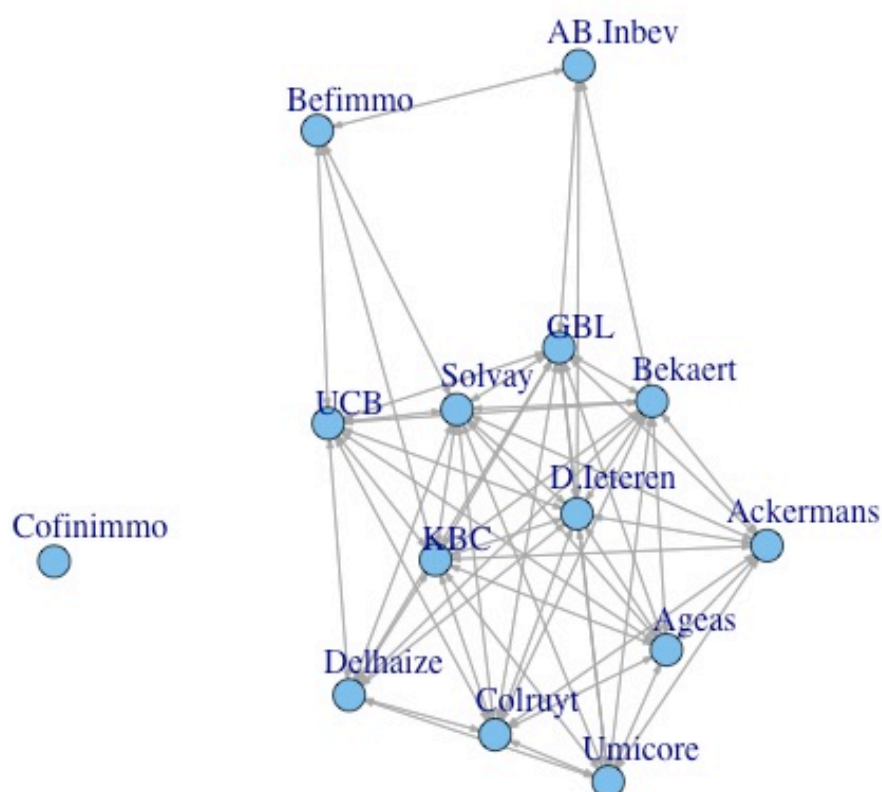


Figure 4 : Réseau 2001

Ensuite, pour ce qui est du nombre de degré de chaque nœud (voir tableau en annexe 4), UCB n'est plus le nœud avec le plus de connexions. On remarque même que cette entreprise perd deux degrés. Tout du contraire, les cinq entreprises qui sont Bekaert, D'Ieteren, GBL, KBC et Solvay deviennent les nœuds les plus connectés avec un degré de 22. Cofinimmo conserve un degré nul car il n'est toujours pas entré dans le réseau. Ab Inbev et Befimmo ont maintenant un degré qui s'élève à 8 alors qu'auparavant Ab Inbev n'était connecté qu'à la société UCB et qu'on ne dénombrait aucune connexion pour Befimmo.

De plus, la distribution des degrés (figure en annexe 5) confirme les éléments du paragraphe précédent. En effet, elle est partagée en deux avec trois entreprises ayant entre 0 et 10 degrés tandis que les 11 autres ayant entre 15 et 25 degrés.

Si nous nous intéressons maintenant à la centralité de chaque nœud, reprise dans le tableau en annexe 4, nous remarquons que deux sociétés se partagent la première place pour ce qui est de la centralité d'intermédiarité. Effectivement, la banque KBC ainsi que Solvay, l'industrie chimique, ont tous deux une centralité d'intermédiarité qui s'élève à 6,57. Ces deux sociétés sont suivies d'assez près par Bekaert, D'Ieteren et GBL à 5,90. C'est d'ailleurs ces cinq mêmes nœuds qui ont la plus haute centralité de vecteur propre. Pour toutes ces raisons, en plus d'exercer une influence sur les interactions des autres nœuds, Bekaert, D'Ieteren, GBL, KBC et Solvay sont connectés aux sociétés qui ont le degré le plus élevé à l'intérieur du réseau. Il est à remarquer que Ackermans, qui dispose d'un nombre assez considérable de degré (16), a une centralité d'intermédiarité qui est nulle au même titre que Cofinimmo qui n'est pas du tout connecté aux autres nœuds.

Deuxièmement, lorsque nous analysons les deux autres réseaux construits sur base de coefficient de corrélation transformé en distance (figures 5 et 6 ci-dessous) nous notons que le groupe le plus connecté est formé de GBL et KBC. Il est intéressant de constater que ce sont deux entreprises qui offrent des services financiers. Sur le MST, les sociétés GBL et KBC sont d'ailleurs connectés directement à Ageas qui occupe également une place dans l'industrie de la finance. La même liaison directe se produit pour les entreprises du secteur d'activité « vente au détail et distribution alimentaire » qui sont Delhaize et Colruyt. Ensuite, tout comme pour l'année 2000, c'est encore les trois entreprises les moins connectées dans le premier réseau (figure 4) qui sont les nœuds les plus éloignés dans le dendrogramme ainsi que dans le MST.

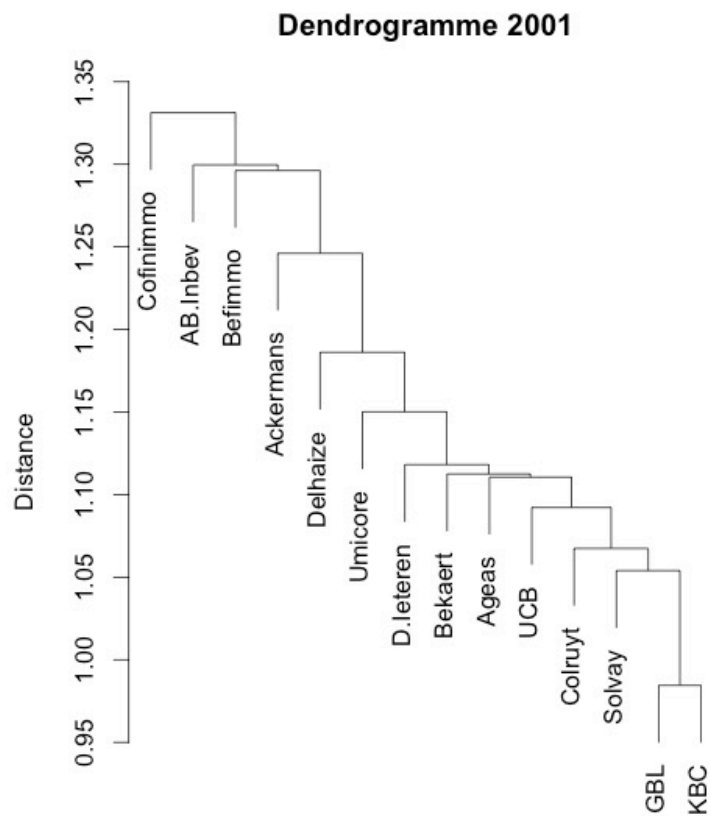


Figure 5 : Dendrogramme 2001

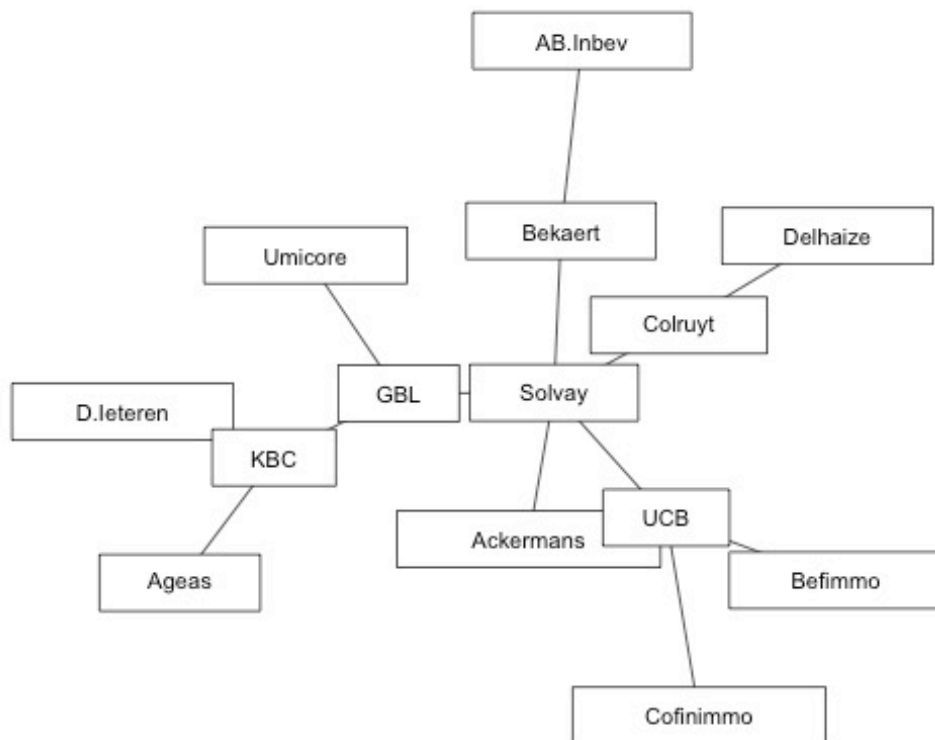


Figure 6 : Minimal spanning tree 2001

3.3. 2002

Tout d'abord, il est évident que le réseau caractérisant l'année 2002, représenté ci-dessous à la figure 7, est plus connecté que ceux des deux années précédentes. Effectivement, celui-ci totalise 284 connexions avec une moyenne de 20 degrés par société. D'ailleurs, à la vue du graphe présentant l'évolution du nombre total de degrés (figure en annexe 1), l'année 2002 détient le réseau qui a le plus de degré comparé aux autres réseaux composés de 14 nœuds. En outre, nous remarquons également que Cofinimmo n'est plus complètement déconnectée du réseau puisqu'elle partage un lien avec Ackermans sur le réseau 2002.

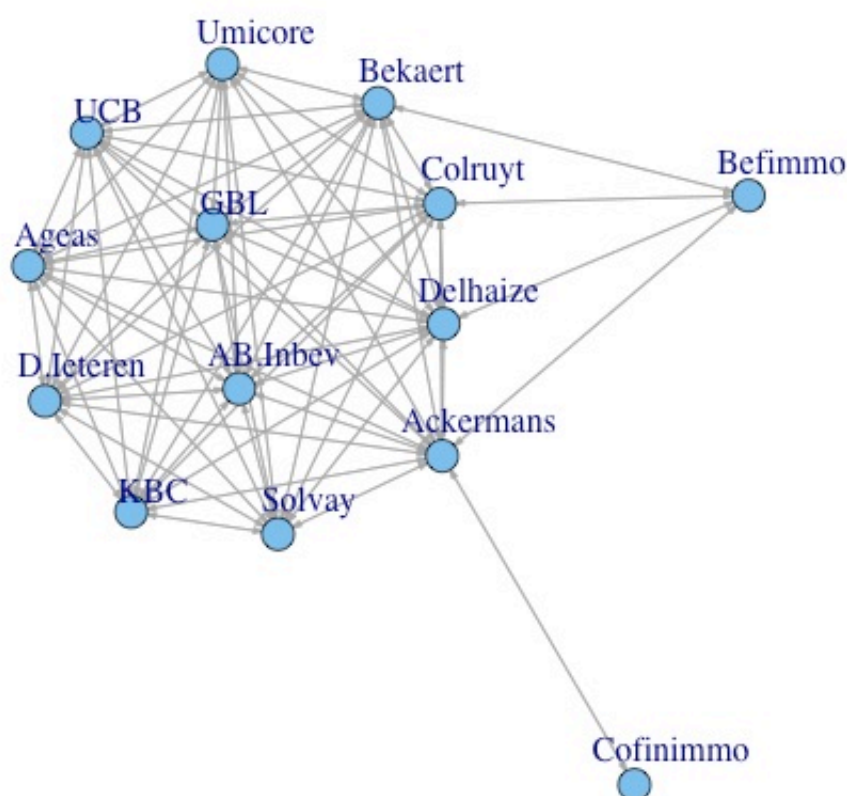


Figure 7 : Réseau 2002

Par ailleurs, suite à l'analyse du tableau en annexe 6, nous remarquons que la grande majorité des sociétés composant le réseau ont un nombre de degrés supérieur à 22. Ceci confirme que le degré de connexion du réseau est élevé pour l'année d'étude 2002. En effet, lorsque le nombre de degrés pour chaque entreprise considérée n'a pas augmenté, celui-ci est resté constant. Pour poursuivre, il est nécessaire de mettre en évidence la forte progression, en

termes de connectivité, qu'effectue Ab Inbev. Effectivement, cette société spécialisée dans la distribution de boisson est passée de 8 à 22 degrés. Enfin, notons le nombre de degré de Cofinimmo (2) qui confirme sa connexion au réseau pour l'année 2002.

Lorsque nous nous intéressons à la distribution des degrés du réseau (voir figure en annexe 7), on s'aperçoit effectivement que la majorité des sociétés se répartissent sur la tranche de 20 à 30 degrés, ce qui confirme les observations précédentes. D'autre part, seulement deux nœuds ont moins de 10 degrés.

Ensuite, nous pouvons dire qu'Ackermans détient une place importante en tant qu'intermédiaire au sein du réseau puisqu'elle totalise, à elle seule, une centralité d'intermédiation de 28 (voir tableau en annexe 6). Cette société est d'ailleurs le seul nœud à être connecté à Cofinimmo comme on peut le voir sur la figure 7 ci-avant. Par ailleurs, les sociétés Bekaert, Colruyt ainsi que Delhaize suivent de loin Ackermans avec une centralité de 4 ce qui signifie qu'elles ont un petit rôle d'intermédiaire dans le réseau. On remarquera, en effet, que les cinq sociétés ayant une centralité positive sont celles qui sont reliés à Befimmo ou Cofinimmo (pour Ackermans). Les autres nœuds ont une centralité nulle. Bien que Cofinimmo ait une centralité de vecteur propre très faible (0,09), les autres sociétés sont connectées aux nœuds ayant une forte connectivité.

En second lieu, le dendrogramme (figure 8) et le MST (figure 9) de l'année 2002 accentuent d'autant plus le groupe des sociétés de services financiers formé d'Ageas, GBL et KBC. Nous pouvons remarquer aussi qu'Ab Inbev se rapproche des autres sociétés et descend dans le dendrogramme. Ceci confirme l'analyse du premier réseau, ci-haut, qui mettait en avant la forte augmentation du nombre de degrés de cette entreprise. Ensuite, encore une fois, les nœuds les moins connectés sur le premier réseau (Befimmo et Cofinimmo) sont les plus éloignés des autres sociétés sur les réseaux formés par le dendrogramme et le MST. Malgré cela, le dendrogramme lie ces deux entreprises qui évoluent toutes les deux dans le secteur d'activité de l'immobilier.

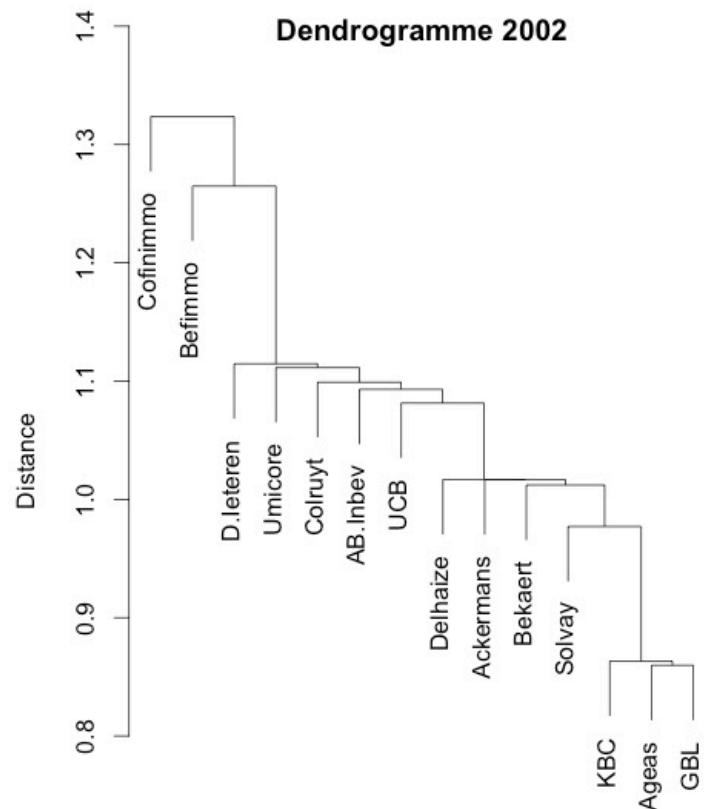


Figure 8 : Dendrogramme 2002

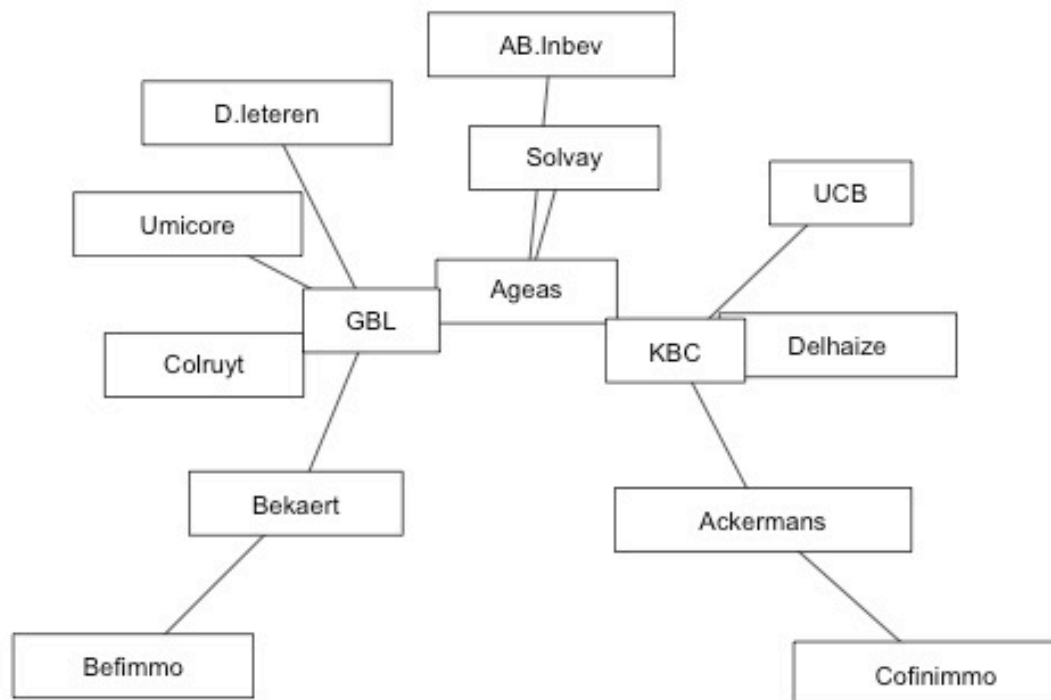


Figure 9 : Minimal spanning tree 2002

3.4. 2003

Une brève étude de l'année 2003 semble suffisante car celle-ci n'amène aucun nouvel élément à l'analyse. Comme on peut le voir sur la figure 10 ci-dessous, Cofinimmo est comme, pour les années 2000 et 2001, totalement déconnectée des autres entreprises. Le réseau pour cette année passe de 284 à 236 degrés ce qui signifie qu'il est moins connecté qu'en 2002.

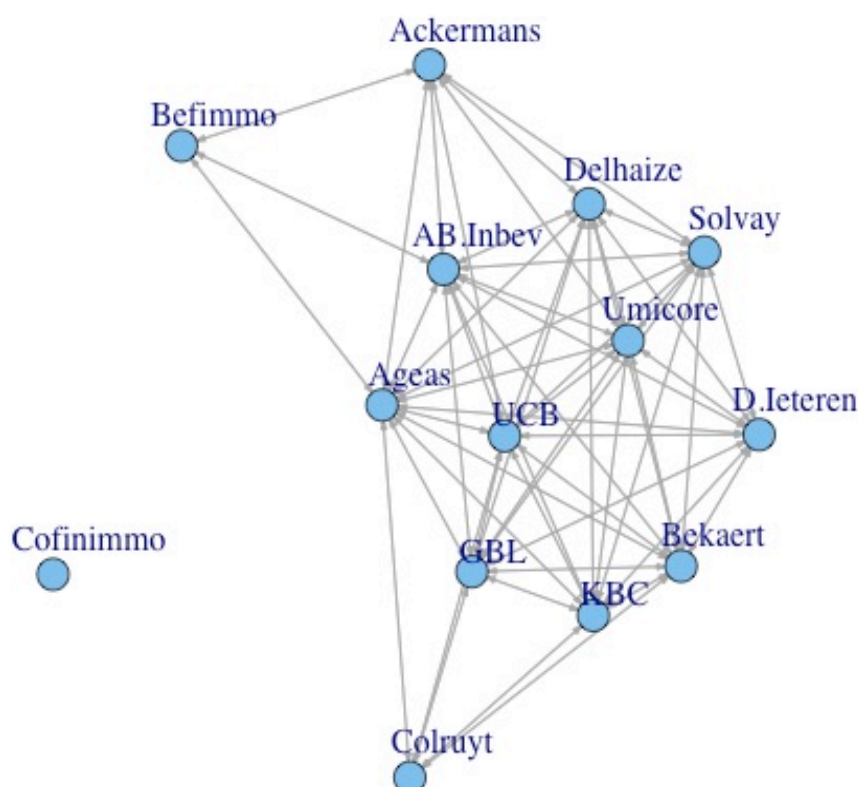


Figure 10 : Réseau 2003

Ensuite, pour cette année d'études, c'est Ageas qui compte le plus de connections dans le réseau comme on peut le constater sur le tableau qui se trouve en annexe 8. Cette société se place, également, au premier rang dans les deux mesures de centralités considérées. Ceci est révélateur de la place centrale qu'occupe Ageas.

L'analyse du dendrogramme et du MST (figures se trouvant en annexe 10 et 11) est assez similaire à celle de l'année précédente dans le sens où le groupe liant Ageas, GBL et KBC est toujours présent et que Cofinimmo et Befimmo sont regroupés en dernière position.

3.5. 2004

Premièrement, analysons le réseau de l'année 2004 basé sur les corrélations qui est représenté par la figure 11 ci-dessous. Notons qu'à partir de cette année d'analyse la société de télécommunication Proximus s'ajoute au réseau qui compte maintenant 15 nœuds. Il est intéressant de remarquer que malgré l'arrivée de cette dernière le réseau semble beaucoup plus déconnecté comparé aux autres années avec 196 degrés au total.

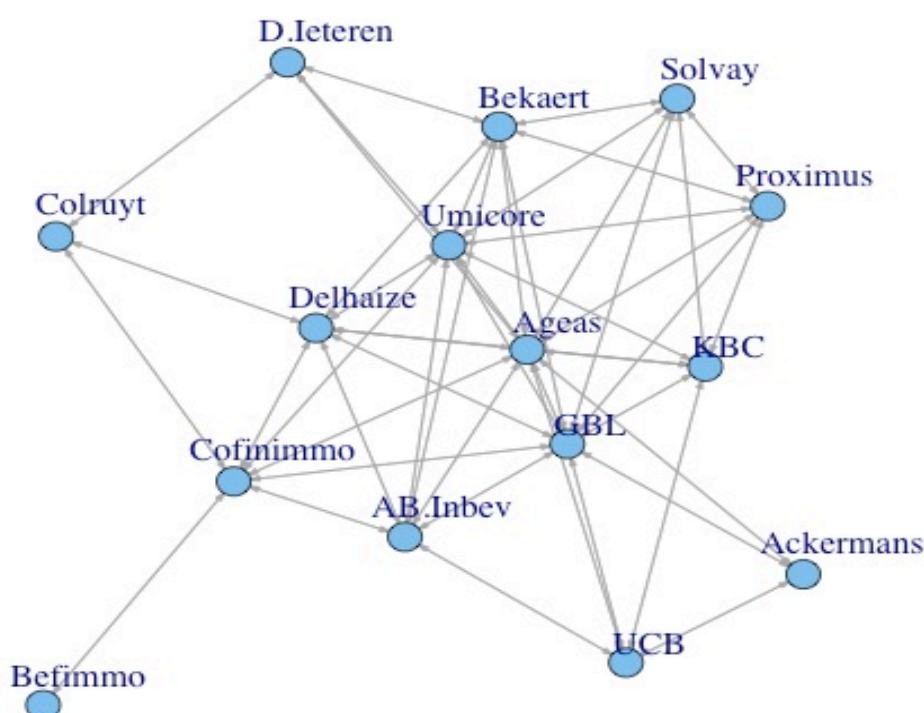


Figure 11 : Réseau 2004

L'analyse du nombre de degrés pour chaque nœud (présenté sur le tableau en annexe 12) révèle qu'Ageas et GBL, qui font partie de la même industrie, sont les entreprises les plus connectées du réseau avec respectivement 24 et 22 degrés. Elles sont suivies de près par Umicore qui totalise 20 degrés. Il est intéressant de remarquer que Cofinimmo qui était, pour la plupart du temps avant, déconnecté du réseau détient 14 degrés pour l'année 2004. La société ayant le moins de connexion dans le réseau ci-dessus est Befimmo (2 degrés).

Ensuite, l'histogramme des degrés (figure en annexe 13) présente une distribution plus ou moins homogène autour de la moyenne qui est de 13 degrés. Effectivement, cinq entreprises ont de 0 à 10 degrés tandis que cinq autres ont

de 15 à 25 degrés. Les cinq dernières sociétés se trouvent dans la tranche de 10 à 15 degrés englobant la moyenne.

Par ailleurs, intéressons-nous à la centralité de chaque nœud reprise dans le tableau en annexe 12. Nous constatons qu'Ageas et Cofinimmo occupe une place centrale en terme de centralité d'intermédiarité. Notons que Cofinimmo est la seule société à être connectée à Befimmo. Ackermans et Befimmo n'ont, quant à eux, aucun rôle d'intermédiaire dans ce réseau. De plus, il est important de noter qu'Ageas présente la plus grande centralité de vecteur propre alors que ce n'est pas le cas de Cofinimmo qui a une centralité d'intermédiarité élevée. Par conséquent, cette dernière détient un rôle important en tant qu'intermédiaire mais n'est pas connecté aux nœuds les plus importants du réseau. C'est également parce que Befimmo n'est pas liée aux nœuds les plus connectés que sa centralité de vecteur propre est très basse (0,08).

Deuxièmement, le dendrogramme (figure 12) pour l'année 2004 révèle deux groupes séparés. Lorsque le premier est composé de Befimmo, Cofinimmo ainsi que de Colruyt, le deuxième rassemble les autres entreprises. Il est intéressant de remarquer que le groupe le plus connecté selon le dendrogramme est formé d'Ageas et GBL, les deux sociétés qui dénombrent le plus grand nombre de degrés dans le premier réseau ci-dessus. Le groupe Ageas, GBL et KBC apparu dans les précédents réseaux est encore présent dans le MST pour cette année d'études (figure 13). Ackermans et Befimmo se connectent aux autres à une distance élevée. C'est deux sociétés sont les nœuds qui ont le plus petit nombre de degrés dans le premier réseau.

3.6. 2005

Dans un premier temps, au vu du réseau de l'année 2005 présenté ci-dessous (figure 14), on remarque que celui-ci est nettement plus connecté que celui de l'année précédente. Comme calculé dans le tableau en annexe 14, le nombre total de degrés s'élève à 296. Il faut néanmoins préciser l'arrivée de trois nouvelles sociétés dans le réseau : Elia, Engie ainsi que Telenet. On remarque également que ces trois nouvelles entreprises sont faiblement connectées au réseau.

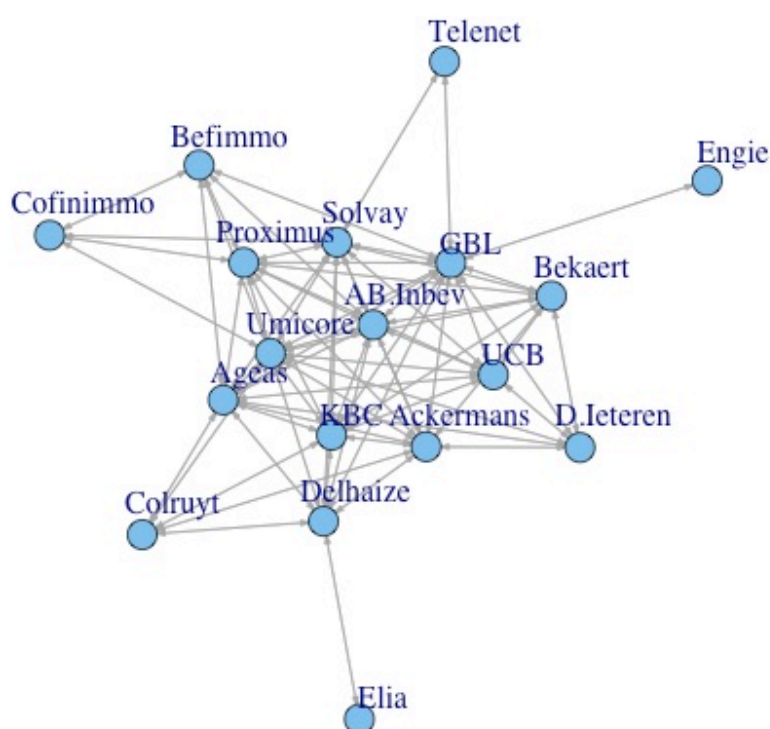


Figure 14 : Réseau 2005

Par ailleurs, un grand nombre d'entreprises ont entre 22 et 28 degrés comme on peut le voir dans le tableau en annexe 14. Nous remarquons que GBL et Umicore sont les entreprises les plus connectées avec 28 degrés. Il est intéressant de relever le fait qu'Elia, Engie et Telenet, les trois nœuds ajoutés cette année, sont les sociétés les moins connectées au réseau. En effet, les deux premières ne comptent que 2 degrés chacune et la dernière en compte 4.

Le graphe présentant la distribution des degrés (figure en annexe 15) confirme les observations faites ci-dessus. En effet, la distribution s'étale de 0 à

30 degrés avec une tendance pour la tranche de 20 à 25 degrés qui compte au total six entreprises. Les autres tranches rassemblent entre deux et trois sociétés.

De la même manière que pour le nombre de degrés pour chaque nœud, il est pertinent de s'intéresser aux mesures de la centralité exposées dans le tableau exposé en annexe 14. Nous remarquons que Delhaize et GBL ont le niveau de centralité d'intermédiarité le plus élevé ce qui signifie qu'ils sont tous les deux des intermédiaires importants au sien du réseau. Umicore, un des deux nœuds ayant le plus de connexion dans le réseau, arrive au troisième rang de cette centralité. Néanmoins, c'est cette société qui est connectée aux nœuds les plus importants du réseau car elle dispose de la plus grande centralité de vecteur propre. Enfin, nous remarquons que les trois nouvelles sociétés ont le plus petit niveau dans les deux mesures de centralité.

En dernier lieu, le dendrogramme (figure 15 ci-dessous) de l'année 2005 met en évidence Solvay et Telenet comme étant le groupe le plus connecté du réseau. On remarque aussi, que les deux entreprises de services financiers, Ageas et GBL sont toujours aussi proches et ce, depuis le réseau de 2002. De plus, un groupement formé de Delhaize et Colruyt est apparu dans le dendrogramme. Il est important de relever 2 choses. Premièrement, GBL, un des deux nœuds ayant la plus grande connectivité et un grand niveau de centralité est central au MST (figure 16 ci-dessous). Deuxièmement, hormis Telenet, les entreprises qui sont le moins connectées dans le premier réseau occupent une place moins importante dans les deux derniers réseaux analysés.

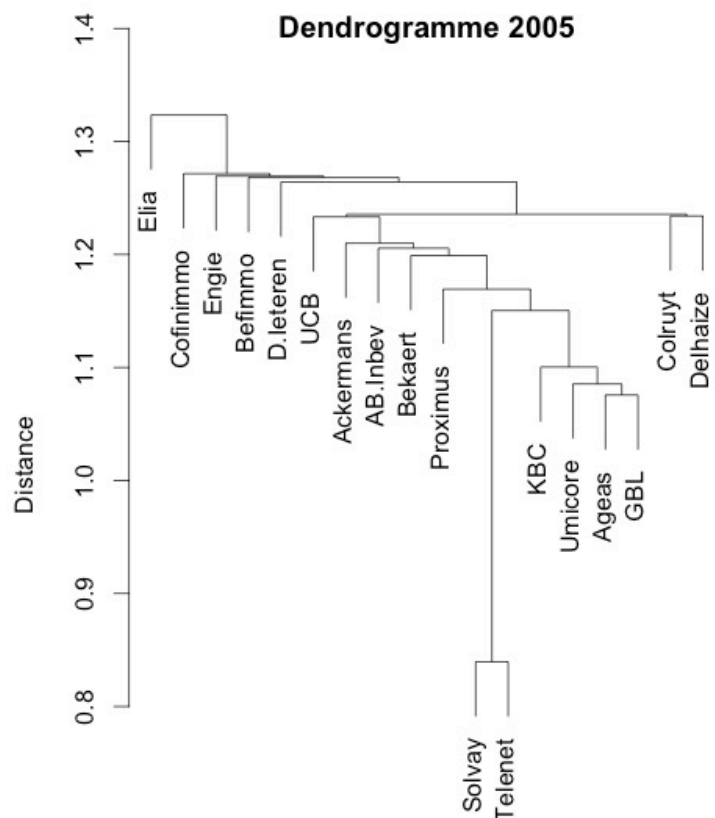


Figure 15 : Dendrogramme 2005

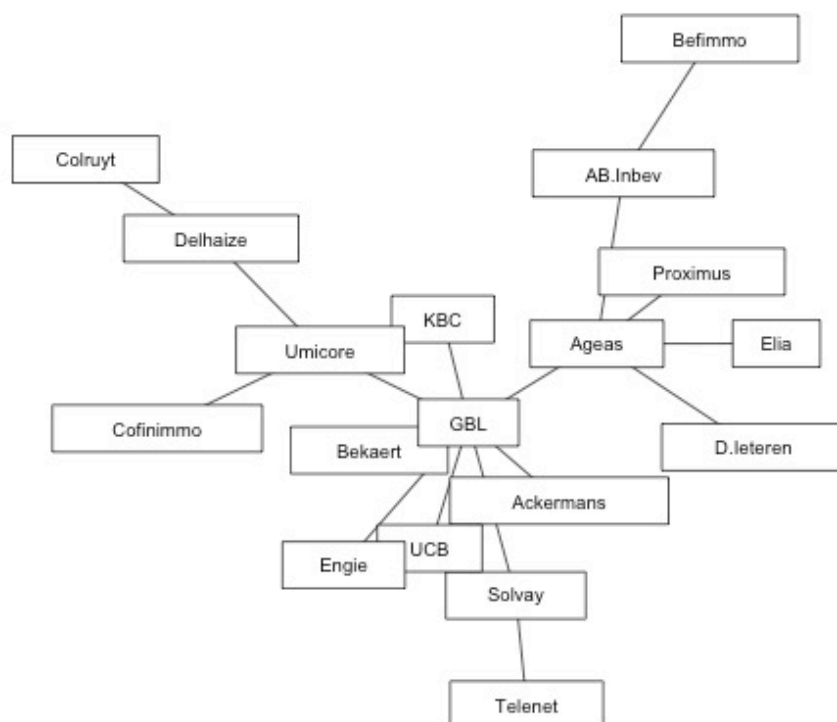


Figure 16 : Minimal spanning tree 2005

3.7. 2006

En premier lieu, précisons que tout comme l'année d'études 2003 une analyse concise pour l'année 2006 semble être suffisante. Au vu de la figure 17 ci-dessous représentant le réseau et du tableau placé en annexe 16, nous remarquons que les sociétés sont fortement connectées entre elles totalisant 524 degrés au total. Nous remarquons également que les trois nœuds ajoutés en 2005 (Elia, Engie et Telenet) sont maintenant bien connectés aux autres entreprises.

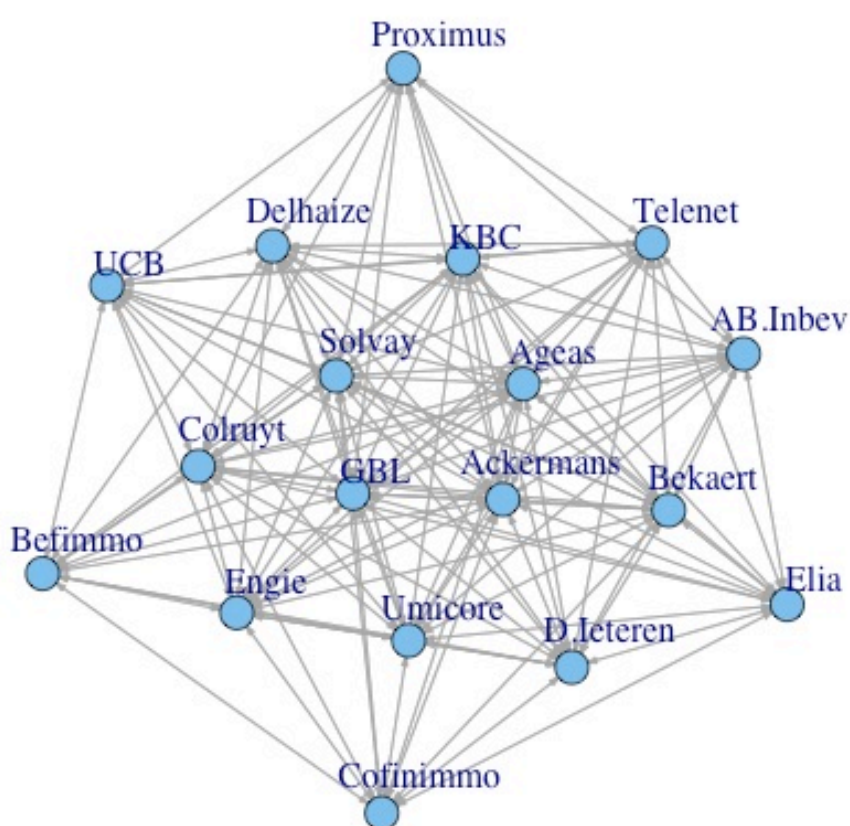


Figure 17 : Réseau 2006

Par ailleurs, en terme de nombre de degrés, c'est Ackermans, Ageas, GBL et Solvay qui sont les sociétés les plus connectées avec 34 degrés chacune. Notons que trois sociétés sur quatre sont du secteur de la finance. Il faut cependant préciser que la totalité des nœuds comptent un large nombre de degrés comme nous le montre le tableau 16 en annexe ainsi que la distribution des degrés en annexe 17. Effectivement, la moyenne de nombre de degrés par

nœud s'élève à 29. C'est également les quatre sociétés les plus connectées qui affichent le plus haut niveau de centralité.

Pour finir, le dendrogramme ainsi que le MST (figures en annexe 18 et 19) ne nous offrent pas d'information supplémentaire. Le groupe le plus connecté est toujours formé de trois entreprises offrant des services financiers. A côté de cela, Befimmo et Cofinimmo forme un groupement relié aux autres à un niveau de distance élevé. Nous remarquons que l'entreprise la moins connectée est Proximus.

3.8. 2007

Tout d'abord, on remarque rapidement que le réseau 2007, présenté ci-dessous (figure 18), compte plus de connexion que les réseaux précédents. Effectivement, à part Elia, les nœuds semblent fortement connectés entre eux.

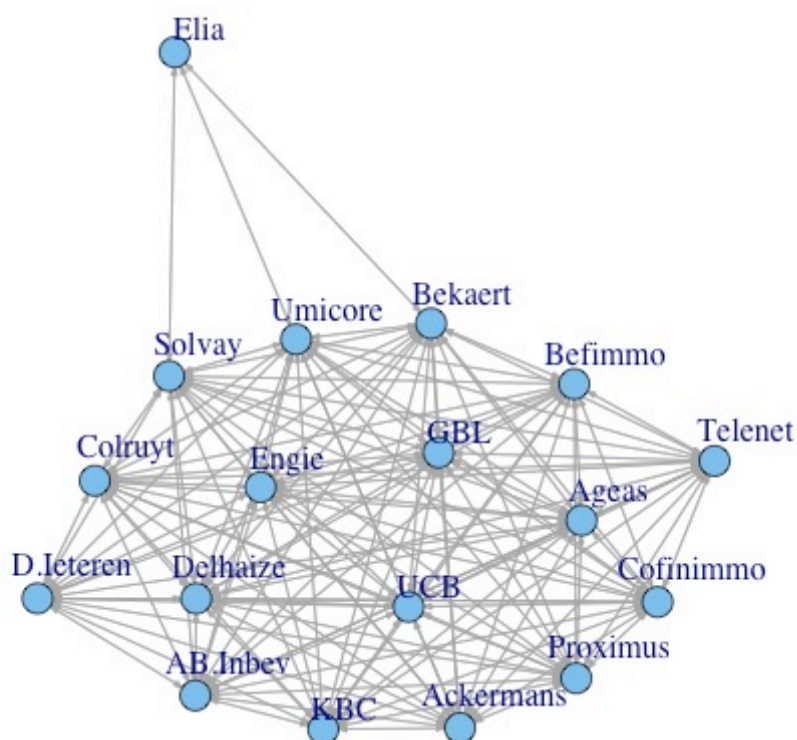


Figure 18 : Réseau 2007

Après analyse du tableau en annexe 20, nous remarquons que les chiffres confirment les observations initiales. En effet, mise à part Elia, l'ensemble des sociétés comptent entre 30 et 34 degrés pour chaque nœud avec une moyenne s'élevant à 30 degrés. Néanmoins, les entreprises les plus connectées au réseau sont Bekaert, Solvay ainsi qu'Umicore. Précisions que ces deux derniers nœuds s'inscrivent dans le secteur d'activité des industries chimiques.

En outre, portons attention à l'histogramme exposant la distribution des degrés en annexe 21. Nous remarquons que le réseau est bien fortement connecté avec seulement un nœud comptant de 0 à 10 degrés. De plus, on s'aperçoit que les 17 sociétés restantes ont entre 25 et 35 degrés.

Ensuite, les mesures de centralité (tableau en annexe 20) permettent d'obtenir de plus amples informations quant à l'importance de chaque nœud dans le réseau. Nous remarquons que les trois sociétés qui se placent en tant que plus gros intermédiaires sont les trois nœuds les plus connectés du réseau (Bekaert, Solvay et Umicore). Elles sont également reliées aux entreprises les plus importantes. Par contre, d'Ieteren, Elia et Telenet ont une centralité d'intermédiation qui est nulle. Il est intéressant de remarquer que malgré le fait que d'Ieteren et Telenet n'ont pas un rôle d'intermédiaire entre les autres nœuds, ceux-ci disposent d'un haut niveau de centralité de vecteur propre.

En second lieu, nous remarquons, sur le MST de 2007 (figure 19 ci-dessous) que GBL occupe une nouvelle fois une place centrale au sein du réseau. C'est d'ailleurs cette société qui forme le groupe le plus connecté du dendrogramme avec Engie et Umicore (figure 20 ci-dessous). De plus, cette année, le groupe Befimmo et Cofinimmo se connectent aux autres à une plus petite distance. C'est Elia, l'entreprise dénombrant le moins de degrés sur le premier réseau, qui occupe la place la plus éloignée.

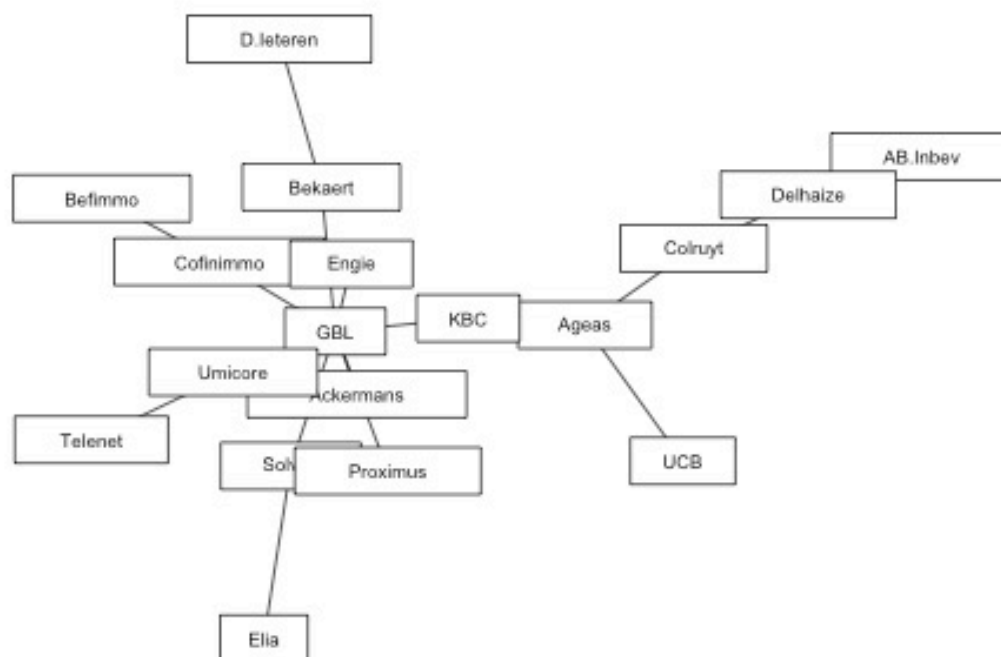


Figure 19 : Minimal spanning tree 2007

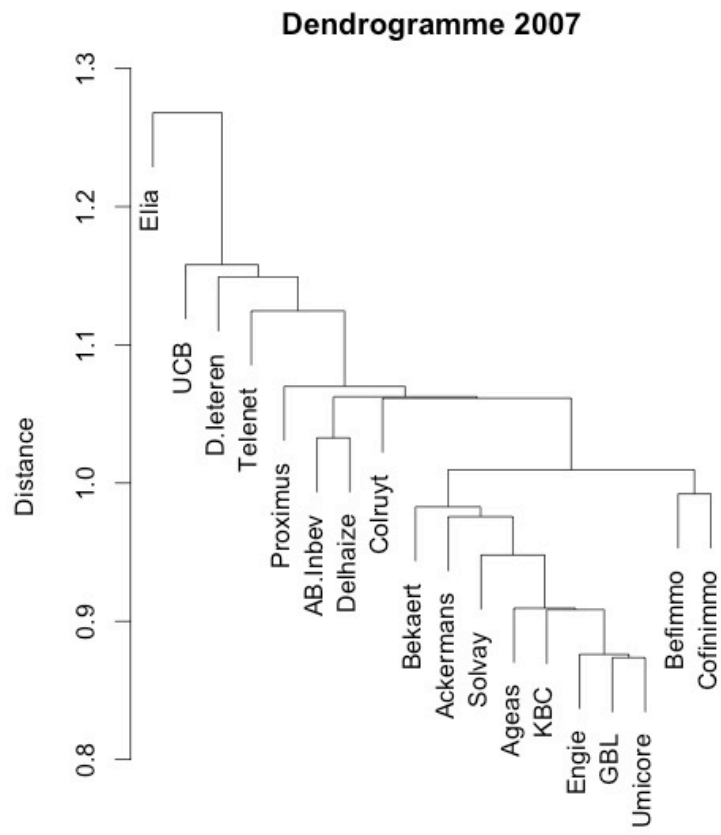


Figure 20 : Dendrogramme 2007

3.9. 2008

Les réseaux obtenus pour l'année 2008, n'apportant pas d'information nouvelle à l'analyse, peuvent être décrits d'une manière plus brève que pour les autres années. En premier lieu, à la vue du réseau ci-dessous (figure 21) et du tableau en annexe 22, nous remarquons qu'Elia est maintenant davantage connectée au réseau (26 degrés) et que toutes les sociétés semblent être fortement connectées. Ceci se confirme lorsqu'on observe ce même tableau exposant un nombre de degrés total équivalent à celui de l'année passée, à savoir 552 degrés.

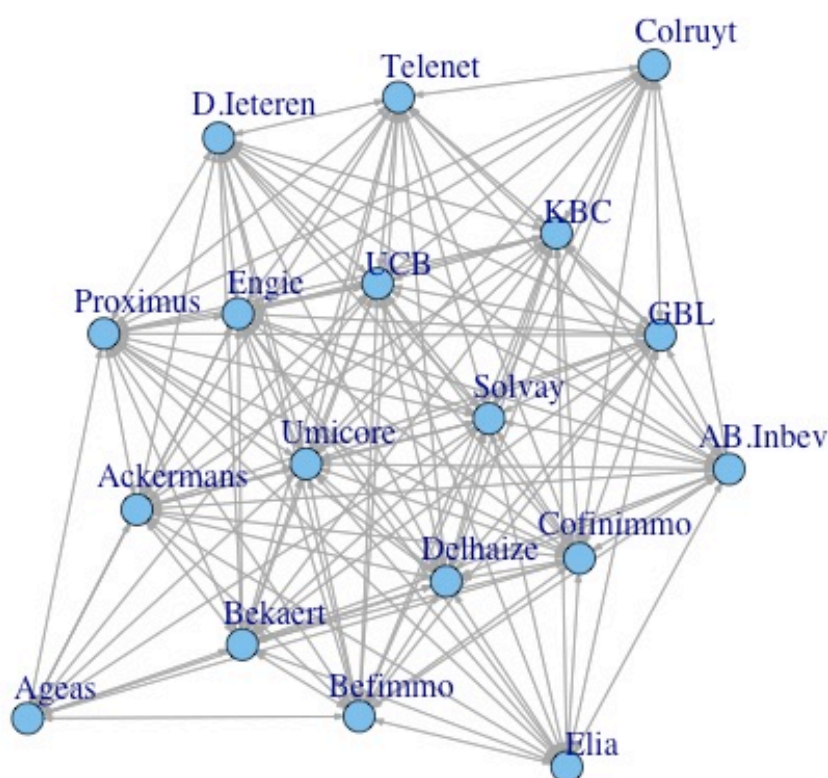


Figure 21 : Réseau 2008

La distribution des degrés (figure en annexe 23) confirme la haute connectivité du réseau. A la différence de l'année 2007, les entreprises se répartissent sur plus de classes entre 24 et 34 degrés avec une tendance certaines pour les deux dernières.

Par ailleurs, on remarque à l'analyse du tableau, en annexe 22, présentant les mesures de centralité, qu'en règle générale, les entreprises ayant un plus

grand nombre de degrés sont celles qui sont les plus centrales en termes de centralité d'intermédiarité. De plus, toutes les sociétés sont, en moyenne, connectées aux nœuds fort connectés dans le réseau.

Pour finir, le groupe GBL-KBC est maintenant le groupe le plus connecté du réseau comme on le voit sur le dendrogramme (figure en annexe 24). Le groupe formé des deux sociétés immobilières est toujours présent. Ceci est également identifiable sur le MST (figure en annexe 25) où GBL occupe encore une place centrale.

3.10. 2009

Dans un premier temps, il faut préciser que Delta Lloyd, une société de l'industrie de la finance, rentre dans le réseau de l'année 2009. Ce dernier est maintenant composé de 19 nœuds. En regardant la figure 22 présentée ci-dessous, la première chose que nous remarquons est que la société Elia est complètement déconnectée des autres nœuds formant le réseau. De plus, Colruyt ne compte pas beaucoup de connexion pour cette année d'analyse.

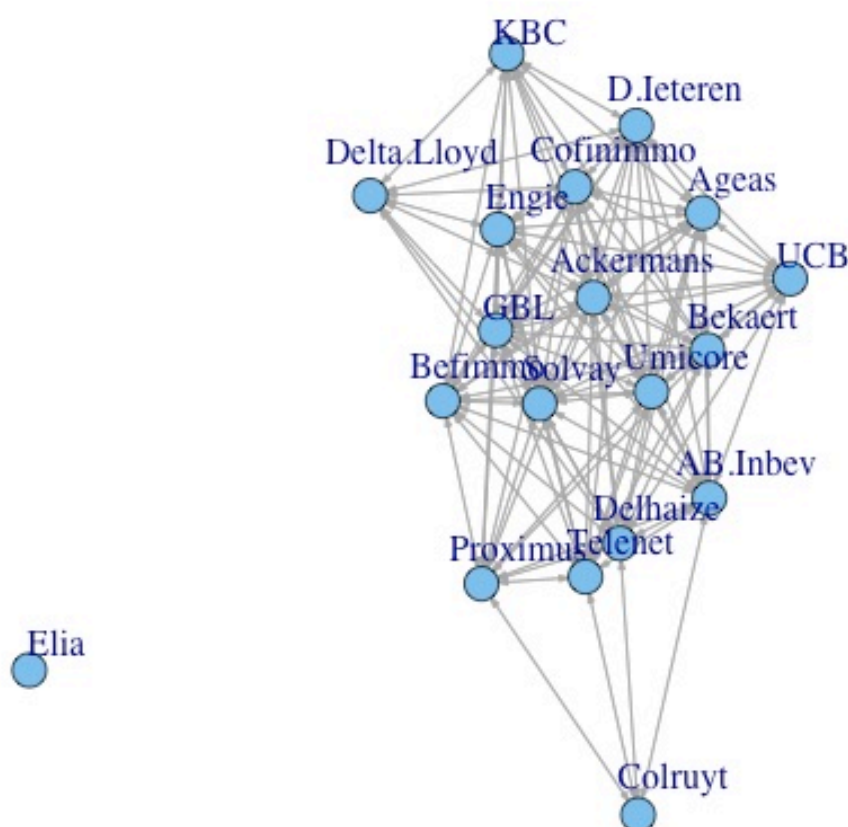


Figure 22 : Réseau 2009

Au vu du tableau se trouvant en annexe 26, on s'aperçoit que ce réseau n'est que faiblement connecté comparé aux deux dernières années. Effectivement, celui-ci ne compte que 472 degrés totaux contre 552 auparavant. De plus, on remarque qu'Ackermans, GBL et Solvay sont les entreprises les plus connectées du réseau avec 32 degrés. Notons que les deux premières occupent le même secteur d'activité. La nouvelle entreprise est, quant à elle, connectée à 8 autres nœuds ce qui lui fait un degré s'élevant à 16. Tandis que Colruyt est faiblement connecté (8 degrés), Elia ne compte aucune connexion (0 degré).

Malgré deux entreprises ayant moins de 10 degrés, la plupart des nœuds ont entre 20 et 35 degrés comme on le voit sur l'histogramme (figure en annexe 27). La tendance se marque pour la tranche de 25 à 30 degrés.

A la vue du tableau se trouvant en annexe 26, il ressort qu'Ab Inbev et Delhaize sont les deux sociétés intermédiaires les plus importantes au sein du réseau. Il est nécessaire de préciser que, comme vu plus haut, ces deux entreprises ne sont pas les plus connectées du réseau. Néanmoins, on remarque que les entreprises ayant le plus grand nombre de degrés ont le plus grand niveau de centralité de vecteur propre.

Dans un deuxième temps, le dendrogramme 2009 (figure 23 ci-dessous) révèle deux groupements distincts. Le premier est formé par deux sociétés évoluant dans un secteur d'activité proche. Il s'agit de Proximus et de Telenet. Celles-ci sont également directement liées par le MST (figure 24 ci-dessous). Le deuxième groupement est composé des autres entreprises hormis Colruyt et Elia, les deux nœuds comptant le moins de connexions dans le premier réseau. Bekaert et Umicore forment le groupe le plus connecté. Notons que ces deux dernières sociétés ont une activité assez proche car elles s'occupent, entre autres, de la transformation de métaux. Umicore est, d'ailleurs, directement reliée à Bekaert et Solvay (faisant partie du même secteur d'activité qu'Umicore) dans le MST.

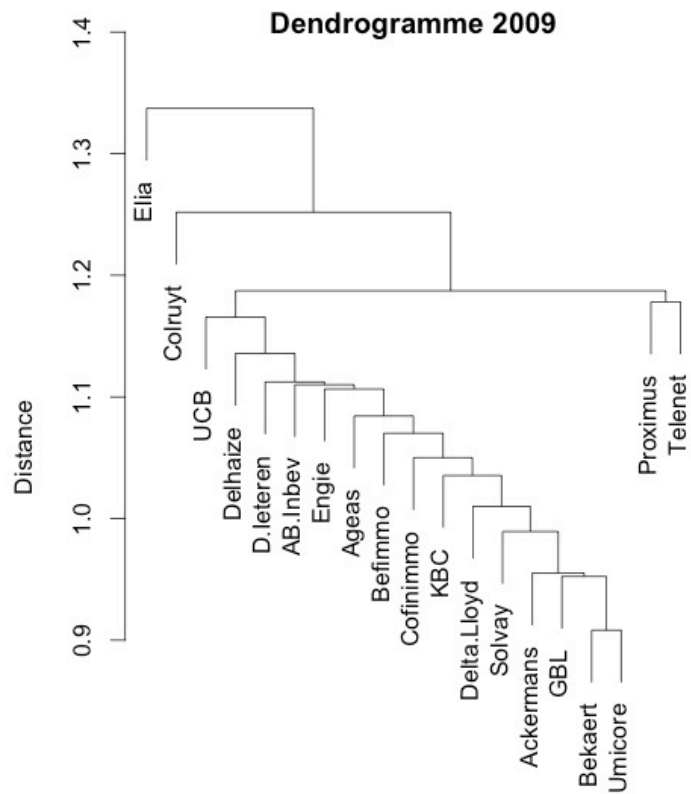


Figure 23 : Dendrogramme 2009

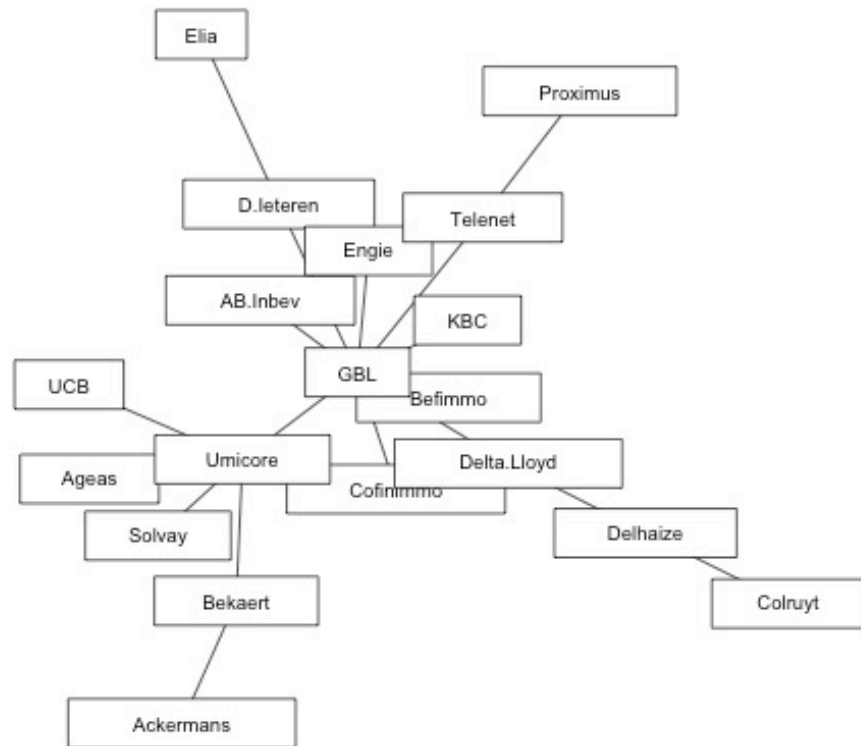


Figure 24 : Minimal spanning tree 2009

3.11. 2010

Il est, tout d'abord, nécessaire de remarquer l'important niveau de connectivité du réseau 2010 qui est présenté ci-après sur la figure 25. La totalité des nœuds sont fortement connectés les uns aux autres.

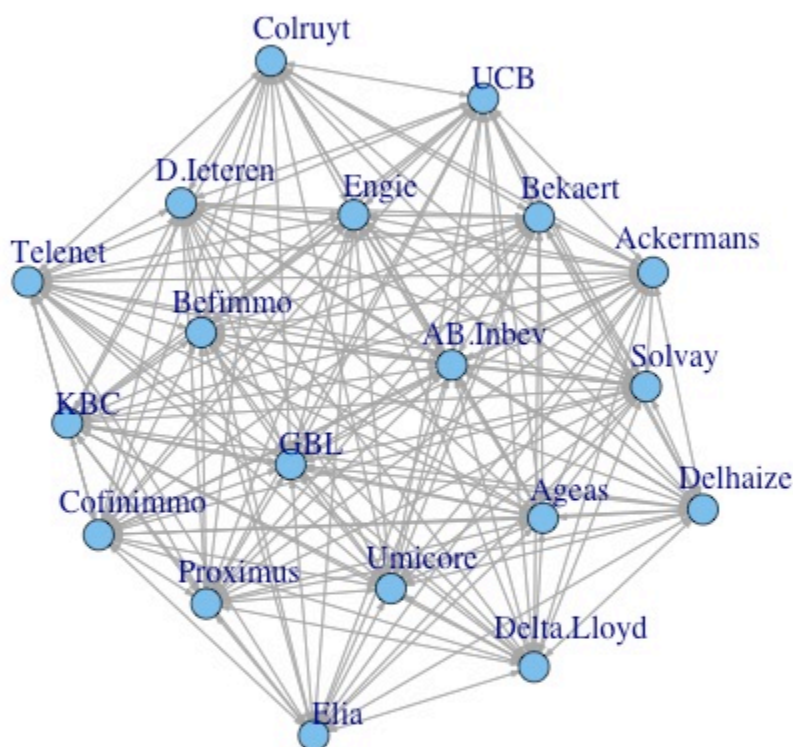


Figure 25 : Réseau 2010

Le tableau en annexe 28 confirme de manière chiffrée les observations ci-dessus. Effectivement, les 19 sociétés formant le réseau ont entre 32 et 36 degrés chacune totalisant 668 degrés. Précisons qu'un nombre de degrés s'élevant à 36 signifie que la société considérée a une connexion avec chaque autre nœud. Ainsi, une moyenne de 35 degrés atteste de la forte connexion des entreprises. Les entreprises les moins connectées sont Colruyt et Elia qui compte 32 degrés.

Sur la figure présentant la distribution de degré pour le réseau 2010 (annexe 29), on remarque que la majorité des entreprises ont 36 degrés.

Ensuite, en termes d'importance au sein du réseau, on s'aperçoit sur le tableau en annexe 28 que Colruyt et Elia sont les deux entreprises ayant la centralité d'intermédiarité au niveau le plus bas. C'est d'ailleurs, le même constat

en termes de centralité de vecteur propre. Néanmoins, le niveau de centralité reste haut dans tous les cas.

Pour finir, après observation du dendrogramme (figure 26) et du MST (figure 27) nous remarquons un certain nombre d'éléments intéressants. Effectivement, sur le dendrogramme, on remarque rapidement qu'Engie et GBL forment le groupe le plus connecté. Il est particulièrement intéressant de noter que ce groupement sera ensuite rejoint par KBC puis par Ageas. Ainsi, trois sociétés de secteur de la finance sont étroitement connectées. De plus, ce graphe fait ressortir aussi un autre groupe d'entreprise intéressant à savoir celui formé de Bekaert et d'Umicore. Ce groupe ressortait également sur le réseau de l'année précédente. Sur le MST, outre le fait que GBL est encore au centre du réseau, on s'aperçoit que quatre entreprises sont liées directement à Ackermans. De plus, trois entreprises de vente de biens de consommation (Ab Inbev, Colruyt et Delhaize) sont aussi connectées directement.

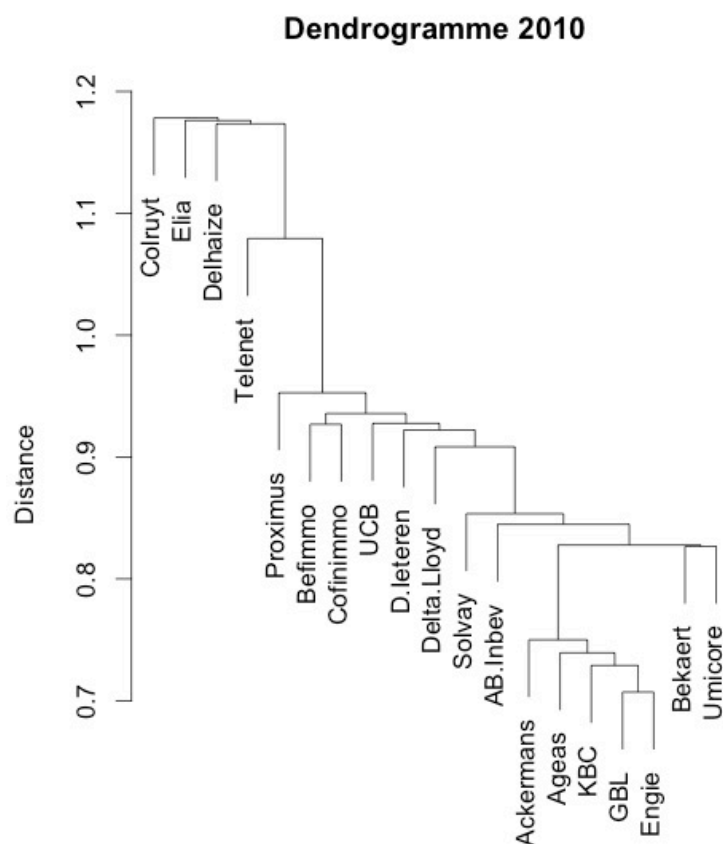


Figure 26 : Dendrogramme 2010

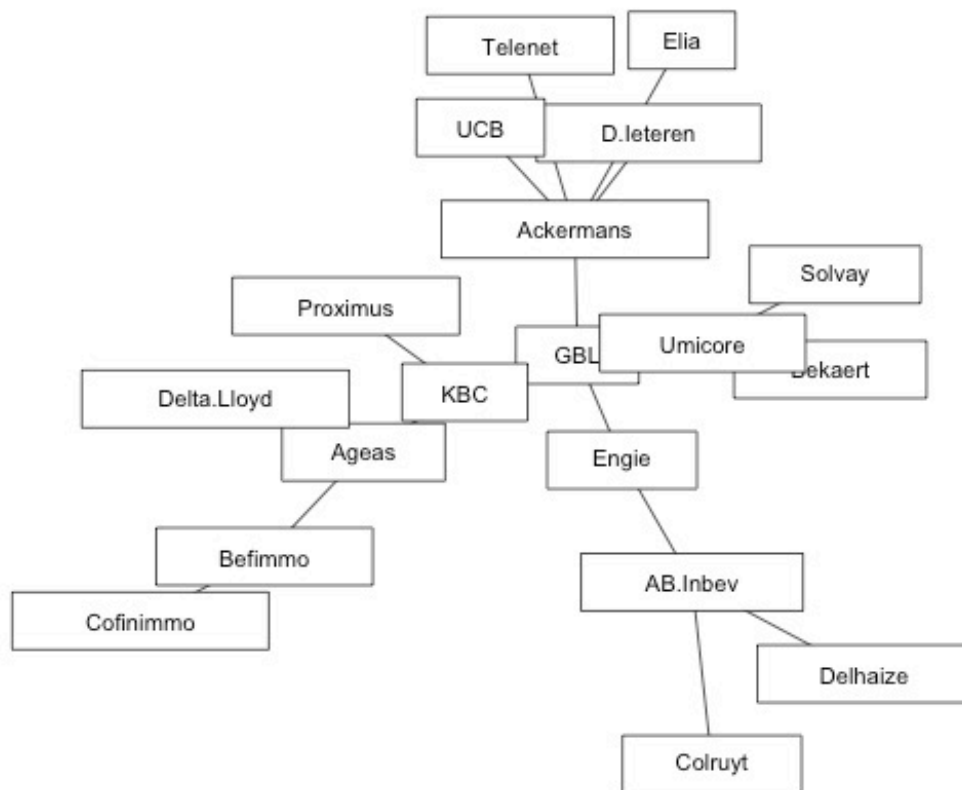


Figure 27 : Minimal spanning tree 2010

3.12. 2011

Premièrement, comme on peut le voir sur la figure 28 ci-dessous, le réseau de 2011 est celui étant le plus connecté jusqu'à présent. On remarque d'ailleurs, sur la figure en annexe 1, qu'avec 684 degrés au total, ce réseau est le plus connecté parmi les autres réseaux composés également de 19 nœuds (de 2009 à 2013).

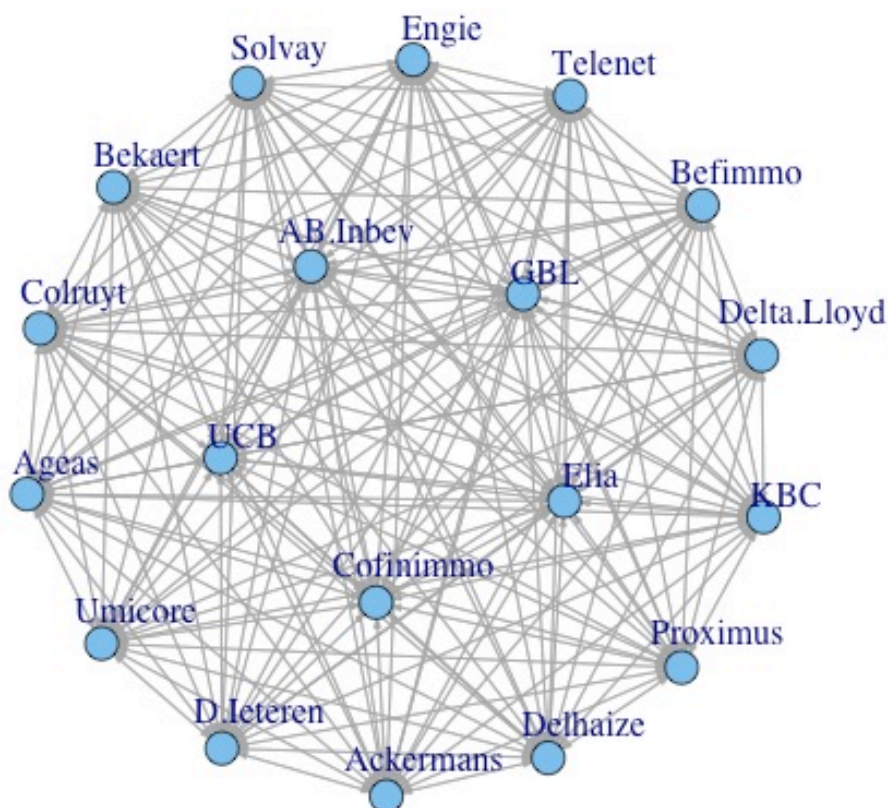


Figure 28 : Réseau 2011

De plus, le tableau en annexe 30 révèle que l'entière des nœuds compte 36 degrés chacun. Ceci signifie que chaque société est connectée une à une à toutes les autres sociétés au sein du réseau. Il est important de préciser que c'est le seul cas de figure sur la période d'analyse de 15 ans.

Obtenir un graphe présentant la distribution de degré est inutile puisque toutes les sociétés comptent le même nombre de degrés (36).

Par ailleurs, on constate sur le tableau en annexe 30 que les 19 entreprises formant le réseau ont une centralité d'intermédiation de 0 et une

centralité de vecteur propre de 1. La première constatation signifie qu'aucune des sociétés ne détient un rôle d'intermédiaire au sein du réseau. La deuxième constatation est une autre manière de confirmer le fait que tous les nœuds soient connectés entre eux. En effet, une centralité de vecteur propre de 1 signifie qu'ils sont tous liés aux nœuds les plus connectés du réseau.

Finalement, le dendrogramme de l'année 2011 (figure 29 ci-dessous) met en avant Ackermans et GBL comme étant les entreprises le plus étroitement connectées. En outre, on remarque que ces deux sociétés financières sont également centrales au MST présenté à la figure 30 ci-après. Cependant, on s'aperçoit qu'un plus grand nombre de liens directs partent de la société GBL. Nous notons également que le MST lie directement Befimmo et Cofinimmo.

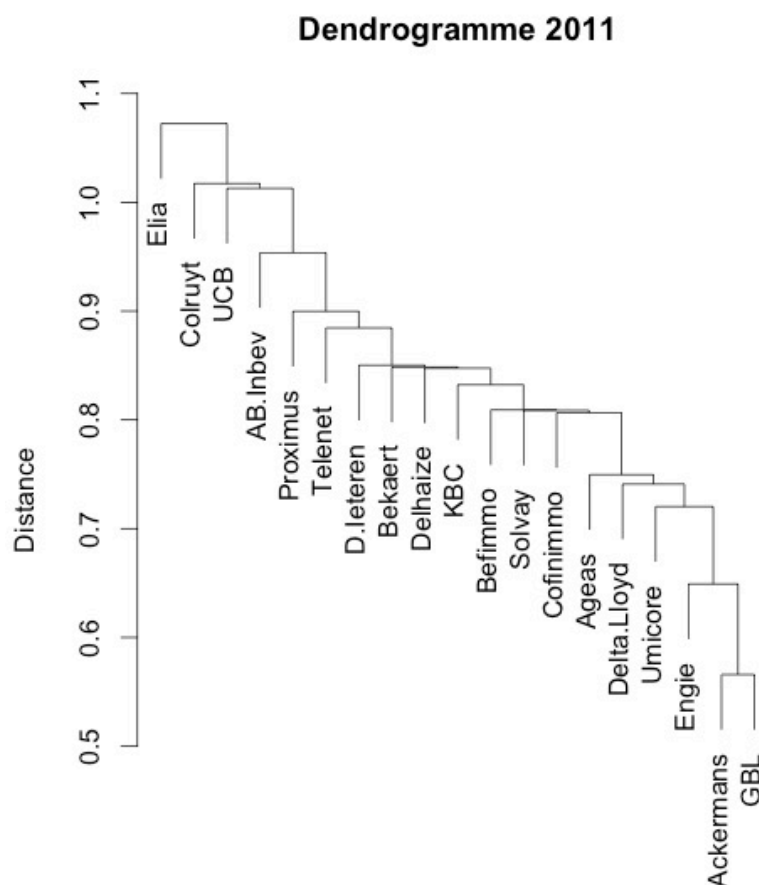


Figure 29 : Dendrogramme 2011

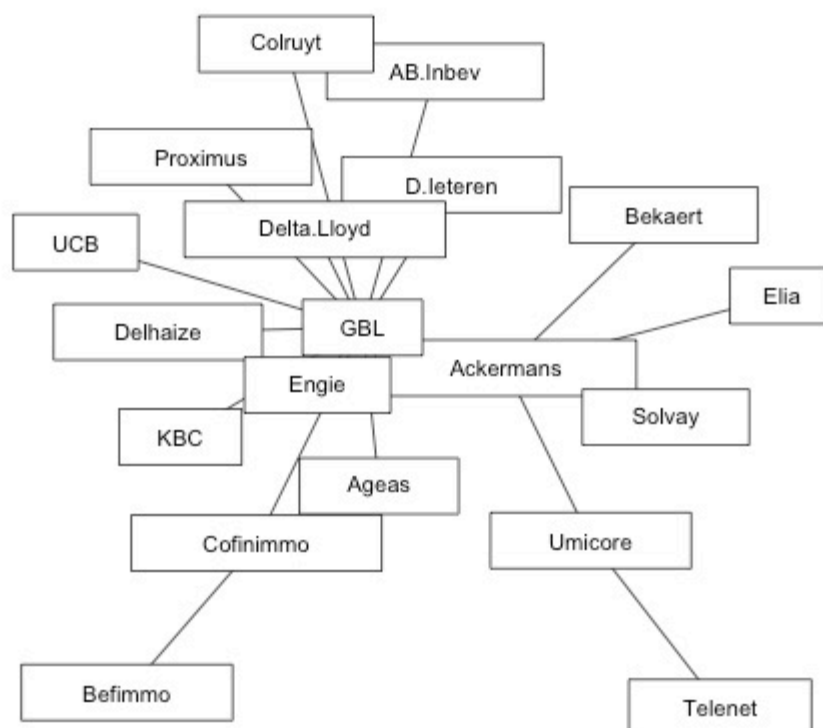


Figure 30 : Minimal spanning tree 2011

3.13. 2012

Dans un premier temps, nous remarquons que le réseau de l'année 2012 présenté ci-dessous (figure 31) est encore relativement bien connecté. Cependant, on peut déjà s'apercevoir que certains nœuds perdent des connexions en comparaison à 2011.

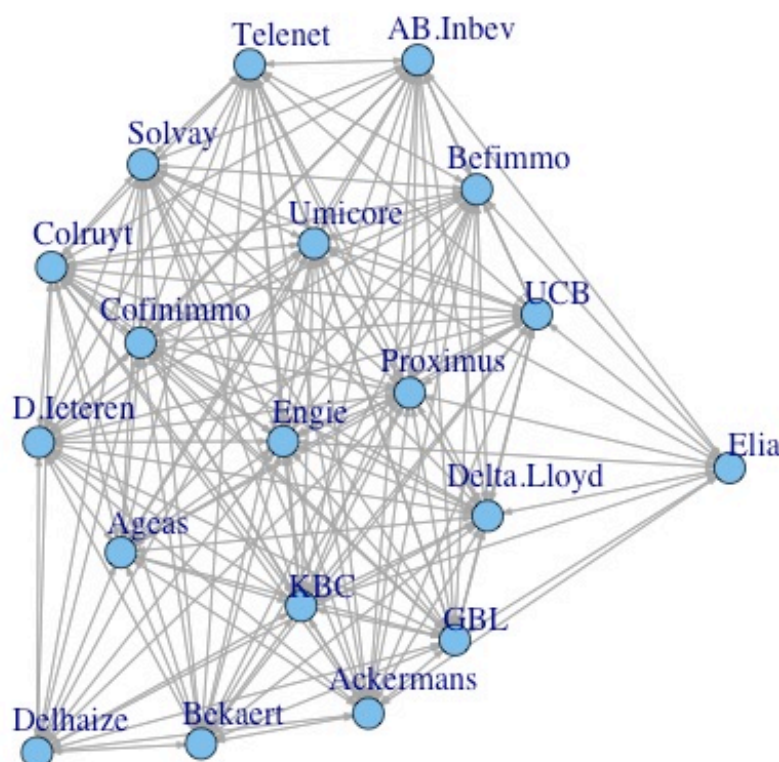


Figure 31 : Réseau 2012

Le tableau en annexe 31 confirme les constatations faites initialement. En effet, le nombre total de degré s'élève à 632 cette année contre 684 en 2011 ce qui prouve la diminution des connexions. Lorsque la plupart des entreprises restent fortement connectées aux autres, Delhaize et Elia ne comptent plus que 26 et 20 degrés. Il est nécessaire de remarquer que parmi les entreprises qui comptent le plus de degrés (36) il y a Ackermans, Delta Lloyd, GBL ainsi que KBC. Ces quatre sociétés évoluent toutes dans l'industrie de la finance.

Par ailleurs, on remarque également sur la distribution des degrés (figure en annexe 32) que deux nœuds se détachent de la majorité. Les autres sociétés conservent un nombre de degrés allant de 30 à 36.

On remarque, également, sur le tableau en annexe 31, que Delhaize et Elia n'occupent aucune place d'intermédiaire dans le réseau car leur centralité d'intermédiarité est nulle. En revanche, les entreprises comptant 36 degrés ont le plus haut niveau dans cette centralité. Il est intéressant de s'apercevoir que Telenet joue un rôle minime en tant qu'intermédiaire alors qu'elle dispose de 32 degrés. Encore une fois, nous constatons que les entreprises les plus connectées sont celles qui sont le plus centrales en termes de centralité de vecteur propre.

En second temps, le dendrogramme pour l'année 2012 (figure 32 ci-dessous) place Ackermans, Ageas, Delta Lloyd et GBL en tant que sociétés les plus étroitement connectées. Elia, le nœud qui totalise le plus petit nombre de connexions dans le premier réseau, est la société qui se regroupe aux autres en dernière position. D'ailleurs, Elia est aussi très excentrée dans le MST (figure 33 ci-dessous). Il est intéressant de se rendre compte que GBL perd sa place centrale de le MST et est remplacée par Ackermans.

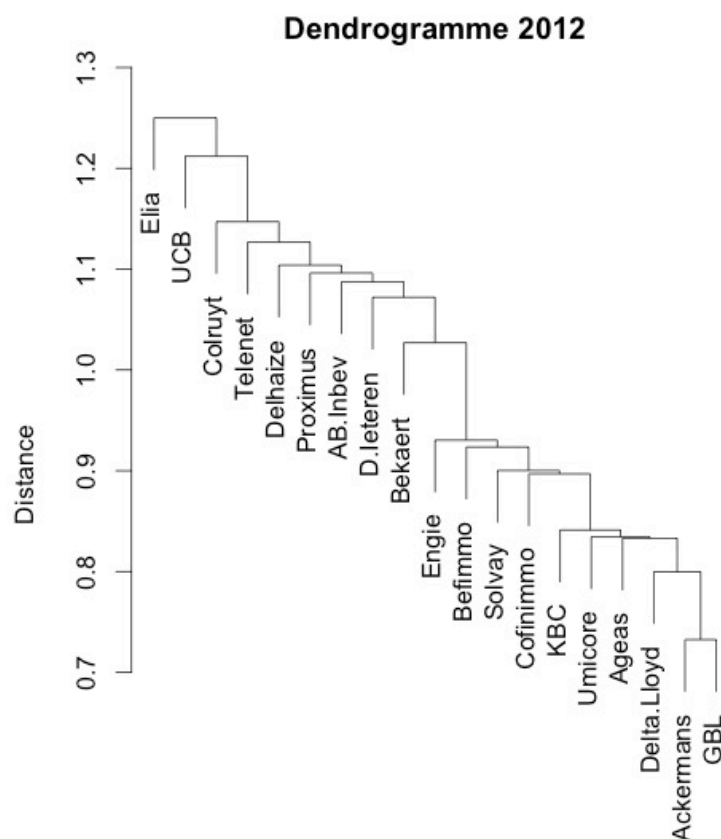


Figure 32 : Dendrogramme 2012

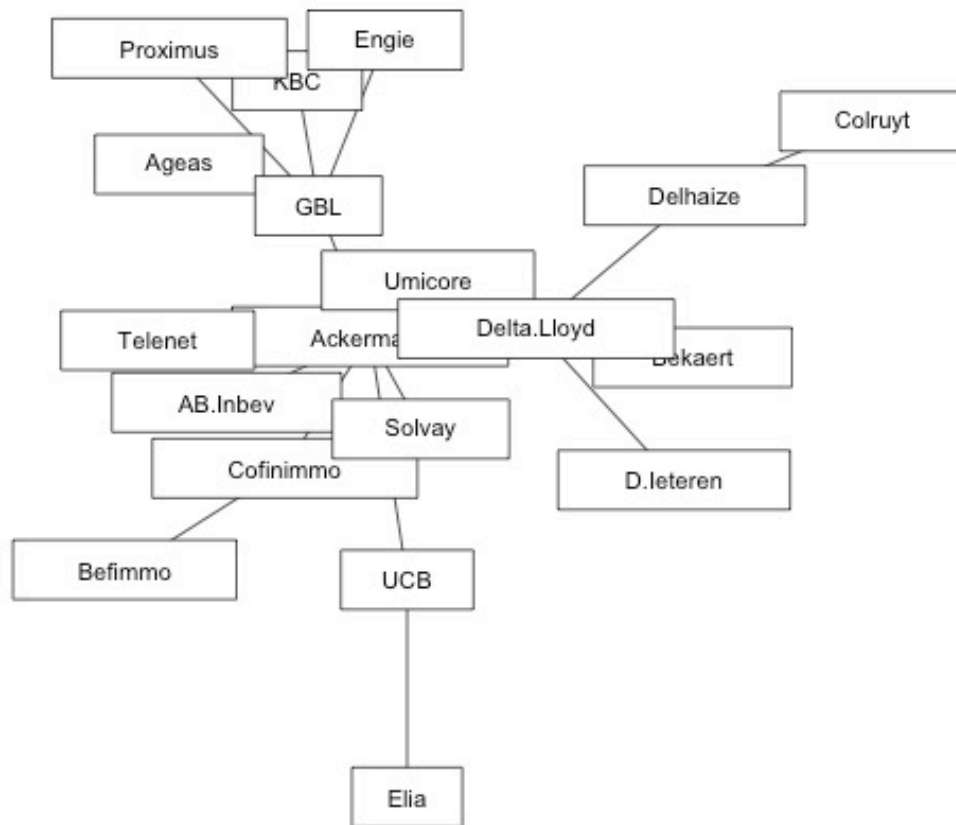


Figure 33 : Minimal spanning tree 2012

3.14. 2013

Tout d'abord, il faut préciser que la société Bpost arrive dans le réseau de 2013 présenté ci-dessous (figure 34). On remarque que, malgré le fait que le réseau soit dans l'ensemble, bien connecté, Bpost ne compte pas beaucoup de connexions.

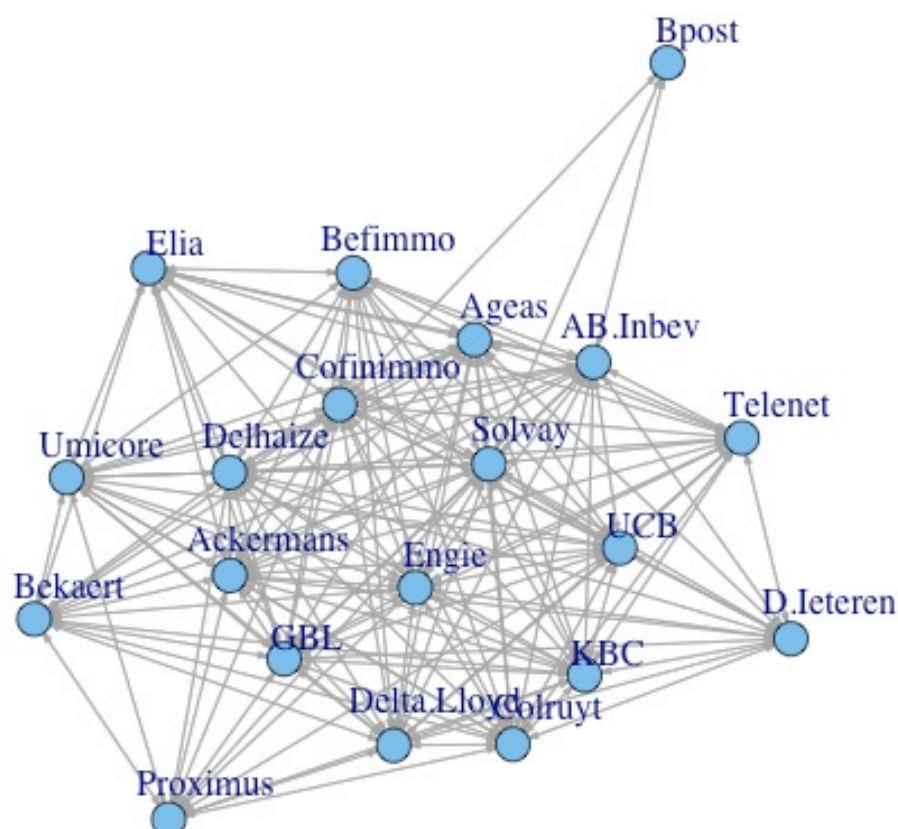


Figure 34 : Réseau 2013

En outre, on constate sur le tableau se trouvant en annexe 33, que le réseau 2013 est faiblement connecté comparé aux deux dernières années et ce même si Bpost y est ajoutée. Effectivement, le nombre total de degrés s'élève à 628 contre 684 en 2011 et 632 en 2012. Les deux entreprises qui comptent le plus de connexions sont Cofinimmo et Solvay qui présentent 38 degrés. Au contraire, Bpost est le nœud qui comporte le moins de liens avec les autres nœuds puisqu'elle a un nombre de degré de 6. Notons également qu'Elia et Proximus sont faiblement connectés au réseau comparé au niveau de connexion moyen de 32 degrés.

Sur l'histogramme des degrés pour l'année 2015 (figure en annexe 34) on remarque bien que la plupart des nœuds ont un fort niveau de connexion. Effectivement, les tranches comprises entre 25 et 40 degrés rassemblent la grande majorité des sociétés.

Ensuite, les deux entreprises ayant la plus grande centralité d'intermédiation sont Cofinimmo et Solvay comme on peut le voir sur le tableau en annexe 33. Notons qu'Ab Inbev se place en troisième position. Nous remarquons, alors, que ces trois dernières entreprises sont les seules connectées à Bpost. De plus, D'Ieteren et Bpost n'ont aucun rôle en tant qu'intermédiaire dans le réseau.

Pour finir, le dendrogramme présenté sur la figure 35 ci-dessous, met en évidence trois groupes d'entreprises directement connectées. Lorsque le premier groupe étant le plus étroitement connecté est formé d'Ackermans et de GBL, le deuxième groupement rassemble Delta Lloyd et KBC. Ces quatre sociétés prennent place dans des secteurs d'activité liés à la finance. Le troisième groupe est composé d'Umicore et Solvay qui ont, toutes deux, une activité dans l'industrie chimique. Ensuite, on voit que Bpost, Elia et Proximus sont les sociétés les moins connectées du dendrogramme comme elles le sont dans le réseau ci-avant. Après analyse du MST (figure 36) on constate qu'Ackermans, GBL et KBC rassemblent beaucoup de connexions directes.

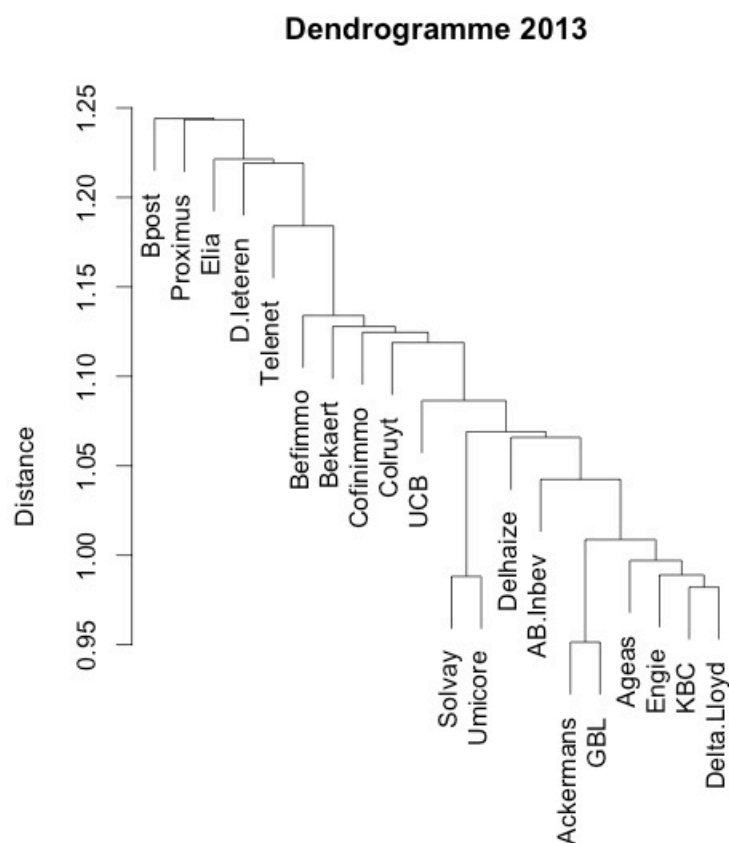


Figure 35 : Dendrogramme 2013

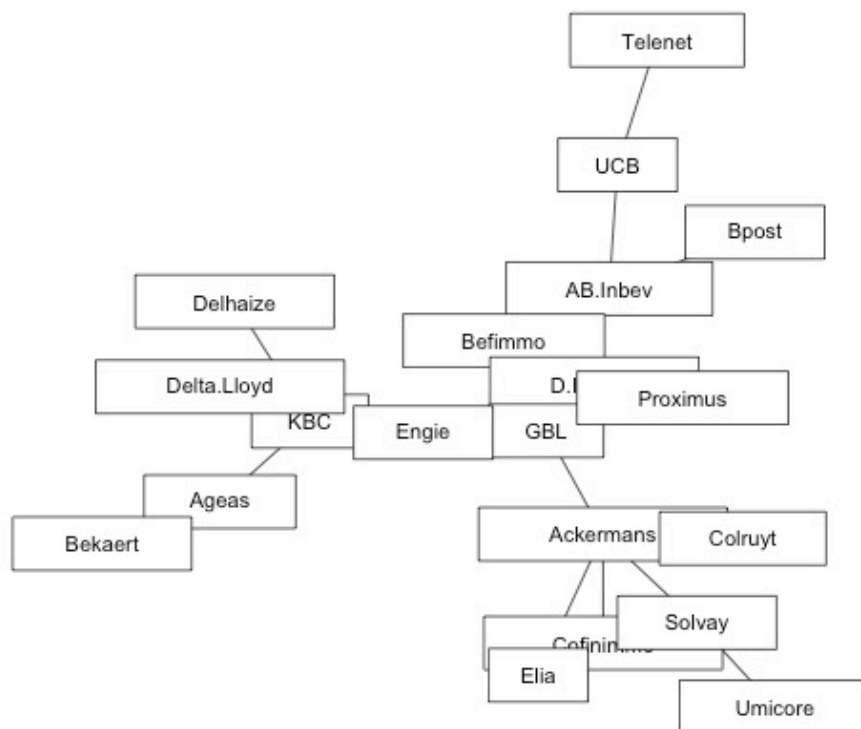


Figure 36 : Minimal spanning tree 2013

3.15. 2014

Au vu du réseau de 2014 (figure 37 ci-dessous), on remarque que les nœuds sont en général fortement connectés entre eux. Cependant, nous constatons que d'Ieteren est l'entreprise comptant le plus petit niveau de connexion. Il est aussi intéressant de voir que Bpost est, maintenant, bien connecté aux autres entreprises.

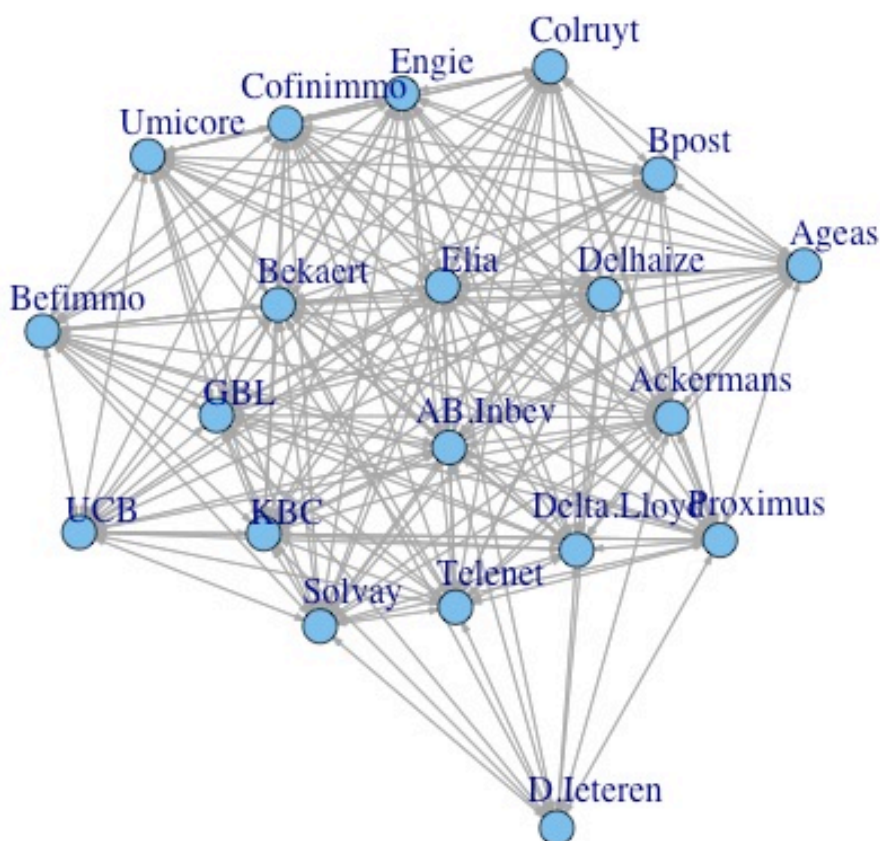


Figure 37 : Réseau 2014

Ensuite, comme le montre la figure (en annexe 1) exposant l'évolution de nombre total de degrés, le réseau 2014 est celui qui dénombre le plus de connexions en comparaison aux autres années d'analyse. En effet, ce réseau compte 704 degrés au total. De plus, on peut voir sur le tableau situé en annexe 35 que les nœuds composant le réseau sont, dans l'ensemble, bien connectés. Néanmoins, d'Ieteren, avec 22 degrés, est la société qui a le plus petit nombre de degrés.

La distribution des degrés (figure en annexe 36) confirme les observations faites auparavant. La majorité des nœuds se répartissent sur les tranches allant de 30 à 38 degrés. Seule une société (d'Ieteren) se trouve dans la tranche 22 à 24 degrés.

Par ailleurs, il est à remarquer sur le tableau en annexe 35, que c'est encore une fois les sociétés ayant le plus grand nombre de degrés qui ont une forte centralité d'intermédiarité. Ces sociétés sont également connectées aux autres éléments importants du réseau. Enfin, on remarque que si d'Ieteren a une centralité de vecteur propre non-négligeable, elle n'occupe cependant pas une place d'intermédiaire dans le réseau.

Finalement, les entreprises étant le plus connectées dans le dendrogramme présenté ci-dessous (figure 39) sont Ackermans et GBL. Les deux sociétés immobilières (Befimmo et Cofinimmo) forment également un groupe mais elles se connectent à une distance plus éloignée que le précédent. De plus, on s'aperçoit que GBL a repris sa place centrale dans le MST (figure 40) puisque la majorité des entreprises sont directement connectées à ce nœud. Celui-ci est également très proche d'Ackermans. Par ailleurs, on constate que, tout comme dans le dendrogramme, Befimmo et Cofinimmo sont directement connectées l'une à l'autre. Enfin, l'entreprise qui totalise le moins de connexions dans le premier réseau (d'Ieteren) se connecte en dernier lieu dans le dendrogramme et est éloignée dans la MST.

4. Analyse générale

Après une analyse détaillée des trois réseaux obtenus pour chaque année d'études, plusieurs observations et constatations pertinentes ressortent.

Dans un premier temps, on remarque qu'il existe un réel lien entre les trois réseaux analysés. En effet, malgré les différents algorithmes utilisés, certaines similitudes apparaissent entre les réseaux considérés. On s'aperçoit que, dans la plupart des cas, les entreprises comptant le moins de connexions dans le réseau basé sur la matrice d'adjacence seront celles qui sont connectées aux autres sociétés de façons plus éloignées dans les deux derniers réseaux. De plus, le groupe étant le plus connecté dans le dendrogramme et le MST sera toujours formé par des entreprises ayant un nombre de degrés très élevé dans le premier réseau.

Ensuite, on constate que les nœuds qui ont le plus grand nombre de connexions dans le réseau de corrélation pure ont toujours un niveau de centralité de vecteur propre étant le plus élevé. Ces entreprises sont, donc, connectées aux nœuds étant eux aussi fortement connectées à l'intérieur du réseau considéré. Ceci semble assez logique et reste cohérent puisqu'une société qui dispose de beaucoup de connexions avec les autres a plus de chance d'être connectée aux entreprises aussi importantes qu'elle dans le réseau. En outre, même si une entreprise fortement connectée a une plus grande chance d'avoir un rôle d'intermédiaire dans le réseau, les constatations faites ci-dessus ne sont pas applicables en termes de centralité d'intermédiation.

Il est, en outre, intéressant de remarquer que les groupements formés (surtout dans le réseau du dendrogramme) rassemblent, dans la grande majorité des cas, des entreprises qui évoluent dans la même industrie ou dans le même secteur d'activité. Effectivement, dans l'analyse de chaque année, on a souvent vu les sociétés offrant des services financiers comme Ackermans Van Haaren, Ageas, GBL et encore KBC se regrouper. Le même constat peut, également, être fait pour Cofinimmo et Befimmo qui évoluent toutes deux dans le secteur d'activité de l'immobilier. D'autres sociétés comme par exemple Delhaize et Colruyt (vente de biens de consommation) ou Telenet et Proximux (télécommunications) sont

également connectées dans certains réseaux. On en déduit qu'il existe bel et bien une corrélation dans l'évolution du prix journalier de leurs titres, et ce, particulièrement pour les sociétés appartenant au même secteur. Plusieurs études comme celle de Mantegna (1999) ou de Coronello et al. (2005) avaient déjà découvert un certain nombre de groupements des sociétés suivant les secteurs et sous-secteurs d'activité dans lesquels étaient inscrites les entreprises. Pour Mantegna (1999), la détection d'une structure hiérarchique dans un portefeuille d'actif échangé sur un marché financier est évidente et consistante avec l'hypothèse qui stipule que les séries temporelles des rendements d'un actif sont affectées par un certain nombre de facteurs économiques.

Lorsque l'on observe le graphique, en annexe 1, représentant l'évolution du nombre total de degrés, on peut remarquer deux augmentations bien prononcées du nombre total de connexions dans le réseau. Celles-ci sont, dans les deux cas, suivies d'une légère diminution. Effectivement, on s'aperçoit qu'un premier pic dans la courbe est atteint au début de l'année 2006 jusqu'à la fin de 2008 et un second du début de l'année 2010 à fin 2011. Il est intéressant de constater que ces deux augmentations coïncident presque parfaitement avec deux bouleversements majeurs survenus pendant la période d'analyse. Effectivement, le BEL 20, l'indice boursier de référence de la bourse de Bruxelles, a connu une chute de 68 % de mai 2007 à mars 2009 suite à la crise des « subprimes ». Cet indice rencontre aussi des difficultés à conserver une tendance boursière à la hausse suite aux problèmes rencontrés par la Grèce ces dernières années. Ainsi, lorsque le pic de 2006-2008 peut être la conséquence des crises financières et économiques de 2007 à 2009, celui de 2010-2011 peut correspondre à la crise de la dette publique que rencontre la Grèce à la même période. Par ailleurs, Billio, Getmansky, Lo et Pelizzon (2012) appliquent récemment, dans leur étude, plusieurs mesures de connectivité aux rendements d'entreprises de l'industrie de la finance. Ils découvrent, alors, que les corrélations entre les secteurs distincts des systèmes financiers ont tendance à être plus fortes durant et après un choc systémique. Les observations obtenues en début de paragraphe sont cohérentes avec cette affirmation. Finalement, ces divers bouleversements peuvent, également, expliquer le fait que toutes les

entreprises soient connectées les unes aux autres dans le réseau obtenu pour l'année 2011.

Enfin, comme l'expliquaient Coronello et al. (2005), il est nécessaire d'utiliser plusieurs méthodes de modélisation afin d'extraire un maximum d'information économique de la matrice de corrélation d'un portefeuille d'actifs. Effectivement, on constate que le réseau basé sur la matrice d'adjacence pour l'année 2011 ne nous offre pas beaucoup d'information hormis le fait que l'ensemble des nœuds soient connectés les uns aux autres. Au contraire, le dendrogramme ainsi que le MST obtenus pour la même année permettent d'obtenir d'avantage d'information sur les groupements et illustrent l'utilité de confronter plusieurs méthodes.

5. Pour aller plus loin

Tout d'abord, il est évident que cette analyse se base sur un échantillon limité de sociétés afin de modéliser la structure du réseau financier belge. Bien que les 20 sociétés considérées fassent partie du BEL 20, l'indice représentatif du marché boursier belge, il aurait été intéressant d'augmenter le nombre d'entreprises analysées afin de confirmer les résultats obtenus et constatations émises dans cette étude. De plus, les séries temporelles de prix utilisées afin de caractériser le rendement de chaque société s'étalent sur une période allant de janvier 2000 à décembre 2014. Comme Plerou et al. (1999) l'expliquent, si le nombre de données historiques échantillonnant le comportement des éléments du système est limité, il est difficile de déterminer si la corrélation des changements de prix entre deux titres résulte vraiment, et uniquement, de l'interaction entre deux compagnies.

En suivant la même idée, comme on l'a vu dans cette analyse, il est courant de constater que les entreprises qui évoluent dans la même industrie ou dans le même secteur d'activité soient étroitement liées. Cela témoigne de l'existence d'une corrélation dans l'évolution de leurs rendements journaliers. Cependant, il pourrait être pertinent d'augmenter le nombre de sociétés dans chaque secteur. Ceci permettrait d'obtenir une analyse sectorielle plus poussée ainsi que de confirmer et, d'éventuellement, accentuer l'existence d'un groupement par secteur.

Ensuite, l'analyse du comportement commun entre les sociétés considérées a été faite sur base de la corrélation du changement de prix journaliers (rendements journaliers) entre deux titres. Une alternative, ou un élément d'analyse supplémentaire, aurait été d'observer la corrélation de l'ampleur des variations du cours boursier entre deux titres. Effectivement, il aurait été intéressant d'analyser les similitudes de comportement entre deux sociétés par une approche de risque en utilisant la volatilité.

Par ailleurs, on a remarqué que, dans la majorité des cas, les entreprises du secteur financier étaient liées entre elles et formaient le groupe de sociétés étant le plus connecté. Cependant, l'analyse ne fournit aucune information quant

à l'influence que peuvent avoir ces entreprises sur les autres. D'autres études, comme celle faite par Kenett et al. (2010), utilisent une mesure de corrélation partielle afin d'observer comment une entreprise peut influencer et contrôler la relation entre deux autres sociétés. Effectivement, la corrélation partielle mesure à quel point la corrélation entre deux variables (comme le rendement par exemple) est affectée par une troisième variable. Il aurait pu être pertinent d'appliquer une telle mesure aux données afin d'avoir une idée de l'influence que certaines entreprises peuvent avoir sur d'autres.

Par ailleurs, les différents réseaux obtenus nous présentent une situation sans nous donner beaucoup d'information sur les éléments qui l'ont causé et qui pourraient expliquer cet état. En effet, à titre d'exemple, Cofinimmo s'est retrouvée, à plusieurs reprises, complètement déconnectée des autres entreprises sans qu'on ne sache vraiment pourquoi. Tout ce qu'on peut dire, c'est que, pour l'année considérée, les coefficients de corrélation du changement de prix de son titre avec ceux des autres sociétés ne sont pas significatifs. Ainsi, il pourrait être intéressant de lier les résultats et observations obtenus à des faits réels en analysant les divers événements survenus lors de la période d'analyse, et ce, pour chaque société.

Enfin, il ne faut pas oublier le fait que les représentations visuelles et les résultats exposés reposent sur une sélection initiale d'algorithmes et de mesures bien déterminée. Effectivement, par exemple, on a vu dans la première partie de ce travail que le dendrogramme ou le MST peuvent, entre autres, être représentés en utilisant la méthode de regroupement par lien simple ou par lien moyen. Dans le cadre de cette analyse, c'est la première technique de regroupement hiérarchique qui a été utilisée. Néanmoins, il aurait été intéressant de pouvoir comparer les deux représentations. De plus, les résultats et conclusions de cette analyse découlent de trois techniques de modélisation de réseau. Il peut être pertinent d'utiliser plus de modèles afin de capturer le maximum d'information issue de la matrice de corrélation construite sur base des séries temporelles des prix des titres.

Conclusion

L'objectif de ce mémoire était d'obtenir une modélisation de la structure du réseau financier belge caractérisé par les sociétés composant le BEL 20, l'indice boursier de référence en Belgique. Ainsi, plusieurs méthodes d'analyse hiérarchique ont été utilisées afin de quantifier le degré de similitude dans l'évolution temporelle du prix des titres correspondant aux entreprises considérées. Dans le but d'analyser l'évolution du réseau au cours du temps, une approche dynamique, sur une période de 15 années, a été appliquée.

Il est intéressant de constater, qu'en règle générale, les rendements des entreprises appartenant au même secteur d'activité évoluent ensemble. De plus, l'approche dynamique permet d'observer une augmentation de la connectivité du réseau dans les périodes de bouleversement économique. Ainsi, on voit un nombre élevé de connexions pendant la période de crise de 2007-2009 ou encore, pendant la récente crise de la dette publique grecque. Ces observations sont cohérentes avec plusieurs conclusions d'auteurs abondamment cités dans la littérature comme Mantegna (1999) et Billio et al. (2012). Par ailleurs, cette présente étude se base sur 20 entreprises sensées être représentatives du système financier belge. Dans ce cas, il faut rester conscient du caractère fini de l'échantillon utilisé et que les conclusions de cette analyse restent contestables et discutables.

Cette étude montre, donc, qu'il est possible de déterminer une structure hiérarchique parmi les sociétés composant le réseau financier belge. Cela est utile dans la description des marchés financiers et dans la compréhension de la structure et de la dynamique sous-jacente à de tels systèmes complexes. En outre, les conclusions sont obtenues en analysant l'information contenue dans les séries temporelles de prix des actifs. Ceci prouve que ces dernières comportent une information économique pertinente et exploitable.

Pour finir, il est évident que les marchés financiers sont devenus considérablement plus complexes au cours des dix dernières années. D'après Billio et al. (2012), cette complexité est la conséquence inévitable de la croissance économique et d'une constante compétition. Plusieurs études

démontrent que, celle-ci, est accompagnée par une augmentation des interconnexions entre les différentes sociétés et les différents marchés. Ceci entraîne, alors, un engouement des chercheurs pour mesurer le risque systémique inhérent au système financier afin de tenter de comprendre, prévoir et d'éviter les bouleversements économiques. Dans de futures recherches, il pourrait, alors, être intéressant d'analyser si une modélisation, comme celle obtenue dans cette analyse, pourrait contribuer aux différentes études et mesures du risque systémique.

Bibliographie

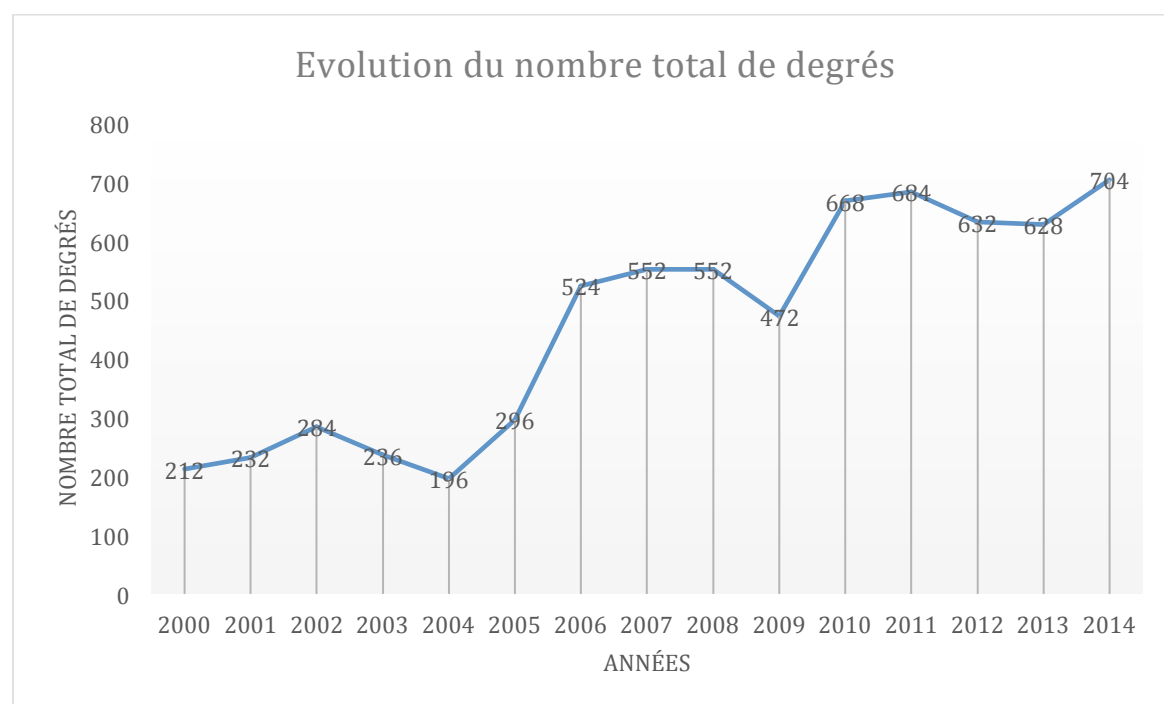
- Anderberg, M. R. (1973). *Cluster Analysis for Applications: Probability and Mathematical Statistics: A Series of Monographs and Textbooks*. New-York: Academic press.
- Arthur, W. B. (1995). Complexity in economic and financial markets. *Complexity*, 1(1), 20-25.
- Belhedi, A. (s.d.). L'analyse classificatoire, postfactorielle & typologique. 14/06/2015, from <http://stadon.voila.net/Classif.htm>
- Benzécri, F. (1985). Introduction à la classification ascendante hiérarchique d'après un exemple de données économiques. *Les cahiers de l'analyse des données*, 10(3), 279-302.
- Billio, M., Getmansky, M., Lo, A. W., & Pelizzon, L. (2012). Econometric measures of connectedness and systemic risk in the finance and insurance sectors. *Journal of Financial Economics*, 104(3), 535-559.
- Bonacich, P. (2007). Some unique properties of eigenvector centrality. *Social networks*, 29(4), 555-564.
- Camo. (2012). *Multivariate data analysis for dummies* (Special ed.). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Challet, D., Marsili, M., & Zhang, Y. C. (2005). *Minority Games: Interacting Agents in Financial Markets (Oxford Finance Series)*: Oxford University Press.
- Cilliers, P. (1998). *Complexity and post-modernism: understanding complex systems*. London: Routledge.
- Coronnello, C., Tumminello, M., Lillo, F., Micciche, S., & Mantegna, R. N. (2007). *Economic sector identification in a set of stocks traded at the New York Stock Exchange: a comparative analysis*. Paper presented at the SPIE Fourth International Symposium on Fluctuations and Noise
- Coronnello, C., Tumminello, M., Lillo, F., Micciché, S., & Mantegna, R. N. (2005). Sector identification in a set of stock return time series traded at the London Stock Exchange. *Acta Physica Polonica Series B*, 36, 2653-2679.
- Euronext. 15/07/2015, from <https://www.euronext.com>
- Freeman, L. C. (1979). Centrality in social networks conceptual clarification. *Social networks*, 1(3), 215-239.

- Gligor, M., & Ignat, M. (2001). Econophysics: a new field for statistical physics? *Interdisciplinary Science Reviews*, 26(4).
- Industry classification benchmark (ICB). 23/07/2015, from <http://www.icbenchmark.com/>
- Johnson, N. F., Jefferies, P., & Hui, P. M. (2003). Financial market complexity. *OUP Catalogue*, number 9780198526650.
- Kenett, D. Y., Shapira, Y., Madi, A., Bransburg-Zabary, S., Gur-Gershgoren, G., & Ben-Jacob, E. (2010). Dynamics of stock market correlations. *AUCO Czech Economic Review*, 4(3), 330-341.
- Kenett, D. Y., Tumminello, M., Madi, A., Gur-Gershgoren, G., Mantegna, R. N., & Ben-Jacob, E. (2010). Dominating clasp of the financial sector revealed by partial correlation analysis of the stock market. *PloS one*, 5(12), e15032.
- Knockaert, S. (2015). *Analyse des caractéristiques d'un réseau financier européen à l'aide d'un test de Granger : approche statique et dynamique*. Mémoire de licence en sciences économiques non publié, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.
- Korte, B., & Vygen, J. (2002). *Combinatorial optimization: theory and algorithms* (2è ed.). Heidelberg: Springer.
- L.Lam. (s.d.). Intégrer le Bel 20, comment ça marche. 19/07/2015, from <http://www.lalibre.be/economie/actualite/integrer-le-bel-20-comment-ca-marche-51b8fa3ce4b0de6db9c9eb30>
- Laloux, L., Cizeau, P., Bouchaud, J.-P., & Potters, M. (1999). Noise dressing of financial correlation matrices. *Physical review letters*, 83(7), 1467.
- Mantegna, R. N. (1999). Hierarchical structure in financial markets. *The European Physical Journal B*, 11, 193-197.
- Mantegna, R. N., & Stanley, H. E. (1999). *Introduction to econophysics: correlations and complexity in finance*: Cambridge university press.
- Markowitz, H. (1952). Portfolio selection. *The journal of finance*, 7(1), 77-91.
- Mehta, M. L. (2004). *Random matrices* (3è ed.). London: Elsevier Ltd.
- Mizuno, T., Takayasu, H., & Takayasu, M. (2006). Correlation networks among currencies. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 364, 336-342.

- Naylor, M. J., Rose, L. C., & Moyle, B. J. (2007). Topology of foreign exchange markets using hierarchical structure methods. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 382(1), 199-208.
- Plerou, V., Gopikrishnan, P., Rosenow, B., Amaral, L. A. N., & Stanley, H. E. (1999). Universal and nonuniversal properties of cross correlations in financial time series. *Physical review letters*, 83(7), 1471.
- Rammal, R., Toulouse, G., & Virasoro, M. A. (1986). Ultrametricity for physicists. *Reviews of Modern Physics*, 58(3), 765.
- Rencher, A. C. (2003). *Methods of multivariate analysis* (2è ed. Vol. 492): John Wiley & Sons.
- Richardson, K., & Zeidan, R. M. (2010). Complexity theory and the financial crisis: a critical review. *Corporate Finance Review*, 14(6), 10-16.
- Rickles, D. (2010). Econophysics and the complexity of financial markets. *J. Collier and C. Hooker: Handbook of the Philosophy of Science*, 10, 1-32.
- Simon, H. A. (1981). *The sciences of the artificial* (2è ed.). Cambridge: MIT Press.
- Tilière, B. D. (2009). *Analyses statistiques multivariées*. Université Paris 6: Laboratoire de Probabilités et Modèles Aléatoires.
- Tumminello, M., Aste, T., Di Matteo, T., & Mantegna, R. N. (2005). A tool for filtering information in complex systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(30), 10421-10426.
- Tumminello, M., Lillo, F., & Mantegna, R. N. (2007). Kullback-Leibler distance as a measure of the information filtered from multivariate data. *Physical Review E*, 76(3), 031123.
- Tumminello, M., Lillo, F., & Mantegna, R. N. (2010). Correlation, hierarchies, and networks in financial markets. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 75(1), 40-58.
- Van Bellegem, S. (2012). *Econométrie*. Syllabus, Université catholique de Louvain, Diffusion Universitaire CIACO.
- West, D. B. (2001). *Introduction to graph theory* (2è ed.). Delhi: Pearson Education, Inc.

Annexes

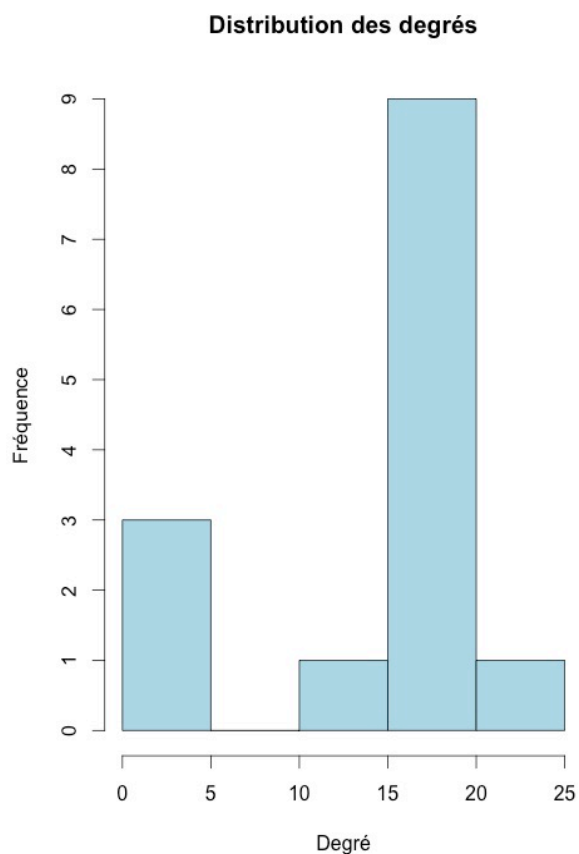
1. Figures et tableaux d'analyse



Annexe 1 : Evolution de nombre total de degrés 2000-2014

	Degré	Centralité d'intermédiation	Centralité de vecteur propre
AB.Inbev	0	0,00	0,00
Ackermans	20	0,86	0,99
Ageas	18	0,00	0,92
Befimmo	2	0,00	0,10
Bekaert	20	0,86	0,99
Cofinimmo	0	0,00	0,00
Colruyt	20	0,86	0,99
Delhaize	20	0,86	0,99
D.Ieteren	18	0,00	0,92
GBL	14	0,00	0,73
KBC	20	0,86	0,99
Solvay	20	0,86	0,99
UCB	22	20,86	1,00
Umicore	18	0,00	0,92
Somme	212		
Moyenne	15,14		

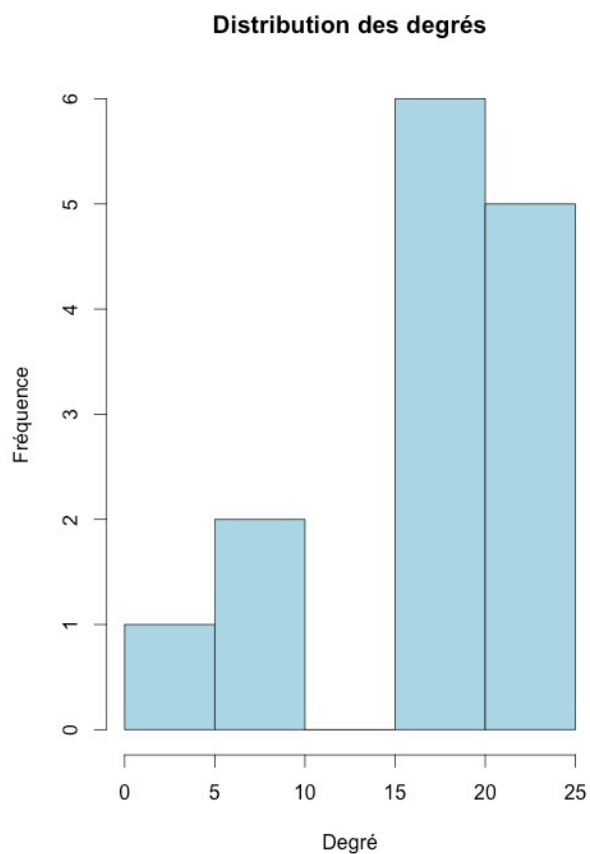
Annexe 2 : Degré, centralité d'intermédiation et de vecteur propre 2000



Annexe 3 : Distribution des degrés 2000

	Degré	Centralité d'intermédiation	Centralité de vecteur propre
AB.Inbev	8	1,50	0,35
Ackermans	16	0,00	0,81
Ageas	18	0,54	0,89
Befimmo	8	1,50	0,33
Bekaert	22	5,90	1,00
Cofinimmo	0	0,00	0,00
Colruyt	20	1,07	0,97
Delhaize	16	0,25	0,81
D.Ieteren	22	5,90	1,00
GBL	22	5,90	1,00
KBC	22	6,57	1,00
Solvay	22	6,57	1,00
UCB	18	3,75	0,84
Umicore	18	0,54	0,89
Somme	232		
Moyenne	16,57		

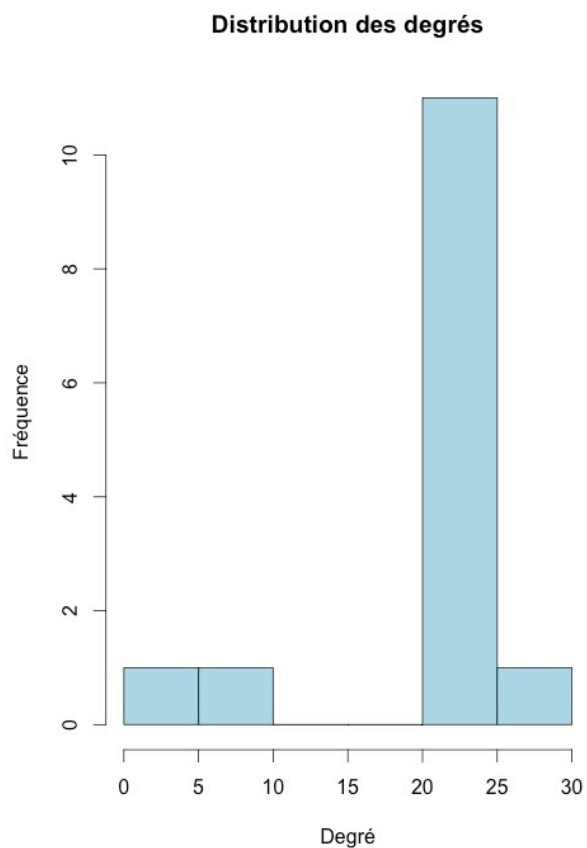
Annexe 4 : Degré, centralité d'intermédiation et de vecteur propre 2001



Annexe 5 : Distribution des degrés 2001

	Degré	Centralité d'intermédiation	Centralité de vecteur propre
AB.Inbev	22	0,00	0,96
Ackermans	26	28,00	1,00
Ageas	22	0,00	0,96
Befimmo	8	0,00	0,36
Bekaert	24	4,00	0,99
Cofinimmo	2	0,00	0,09
Colruyt	24	4,00	0,99
Delhaize	24	4,00	0,99
D.leteren	22	0,00	0,96
GBL	22	0,00	0,96
KBC	22	0,00	0,96
Solvay	22	0,00	0,96
UCB	22	0,00	0,96
Umicore	22	0,00	0,96
Somme	284		
Moyenne	20,29		

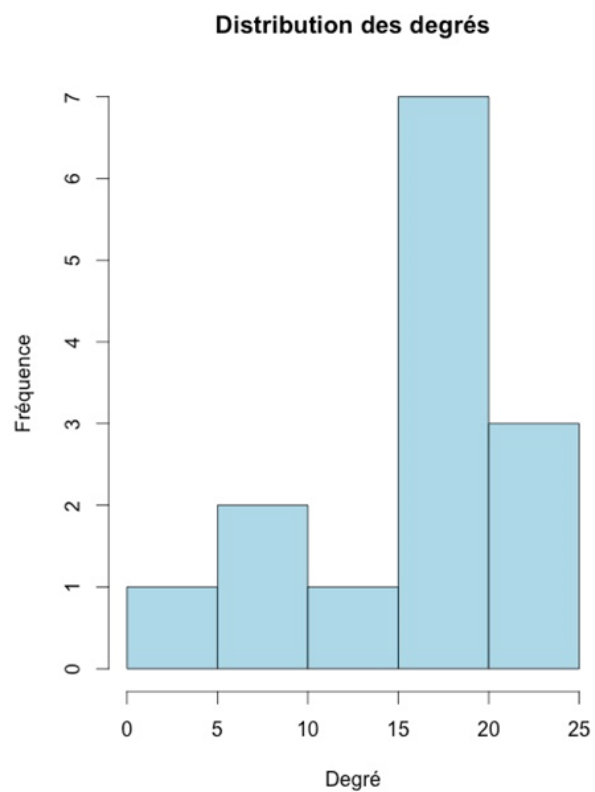
Annexe 6 : Degré, centralité d'intermédiation et de vecteur propre 2002



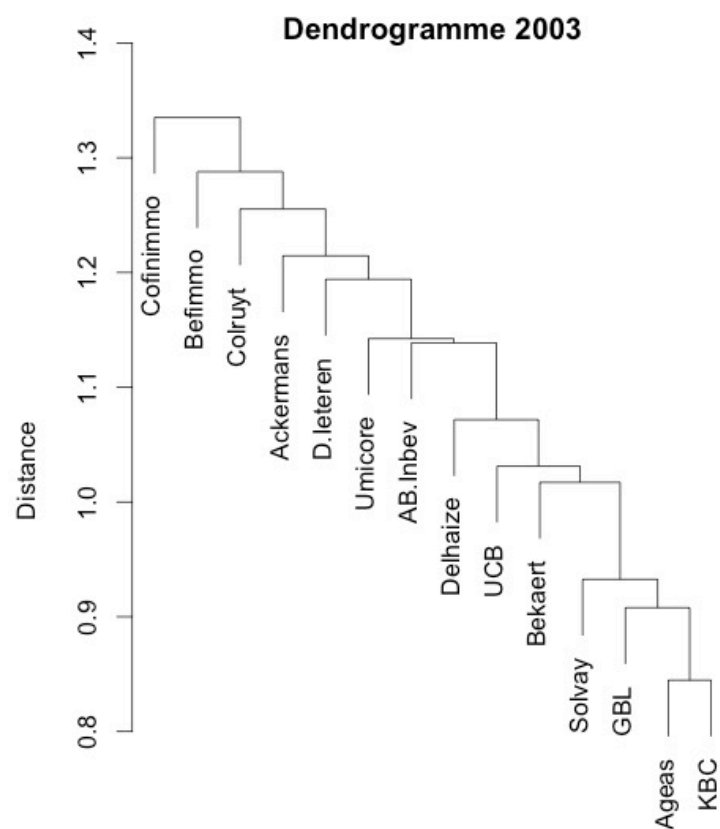
Annexe 7 : Distribution des degrés 2002

	Degré	Centralité d'intermédiation	Centralité de vecteur propre
AB.Inbev	22	8,00	0,95
Ackermans	14	2,67	0,62
Ageas	24	13,00	1,00
Befimmo	6	0,00	0,26
Bekaert	20	2,00	0,92
Cofinimmo	0	0,00	0,00
Colruyt	10	0,00	0,49
Delhaize	20	1,33	0,93
D.Ieteren	18	0,00	0,87
GBL	20	2,00	0,92
KBC	20	2,00	0,92
Solvay	20	1,33	0,93
UCB	22	4,33	0,98
Umicore	20	1,33	0,93
Somme	236		
Moyenne	16,86		

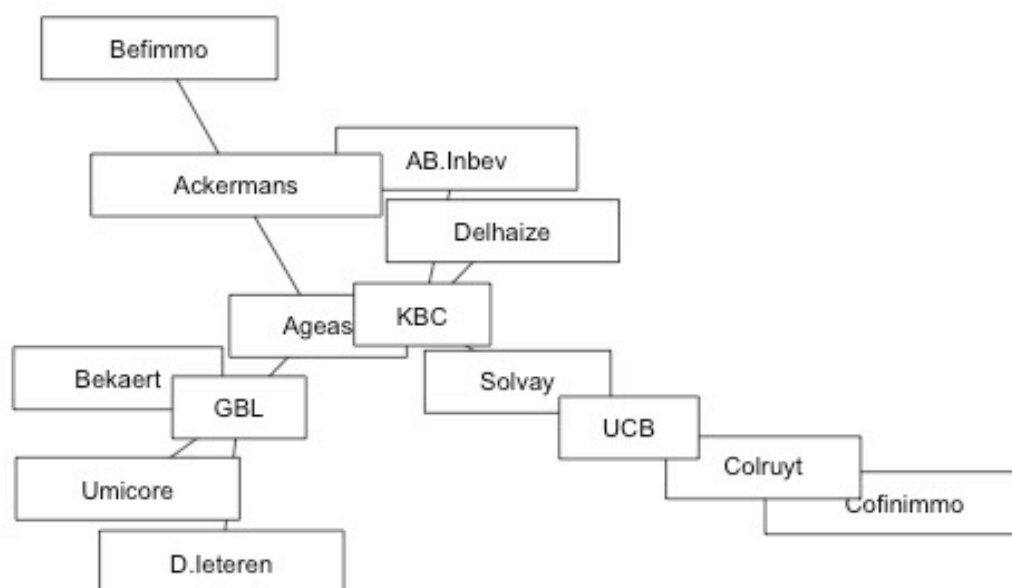
Annexe 8 : Degré, centralité d'intermédiation et de vecteur propre 2003



Annexe 9 : Distribution des degrés 2003



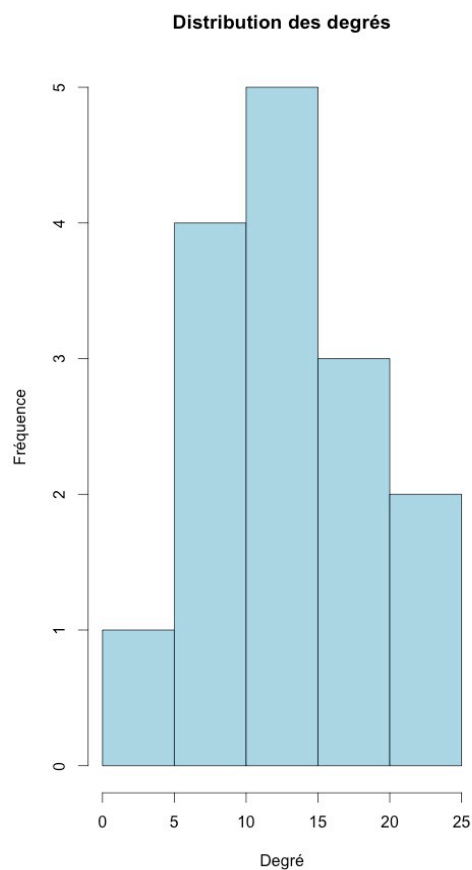
Annexe 10 : Dendrogramme 2003



Annexe 11 : Minimal spanning tree 2003

	Degré	Centralité d'intermédiation	Centralité de vecteur propre
AB.Inbev	14	4,30	0,70
Ackermans	6	0,00	0,31
Ageas	24	32,21	1,00
Befimmo	2	0,00	0,08
Bekaert	16	5,69	0,77
Cofinimmo	14	31,97	0,59
Colruyt	6	1,83	0,22
Delhaize	16	12,48	0,75
D.Ieteren	8	4,07	0,37
GBL	22	21,69	0,96
KBC	14	3,75	0,69
Solvay	12	0,33	0,64
UCB	10	1,73	0,47
Umicore	20	13,59	0,91
Proximus	12	0,33	0,64
Somme	196		
Moyenne	13,07		

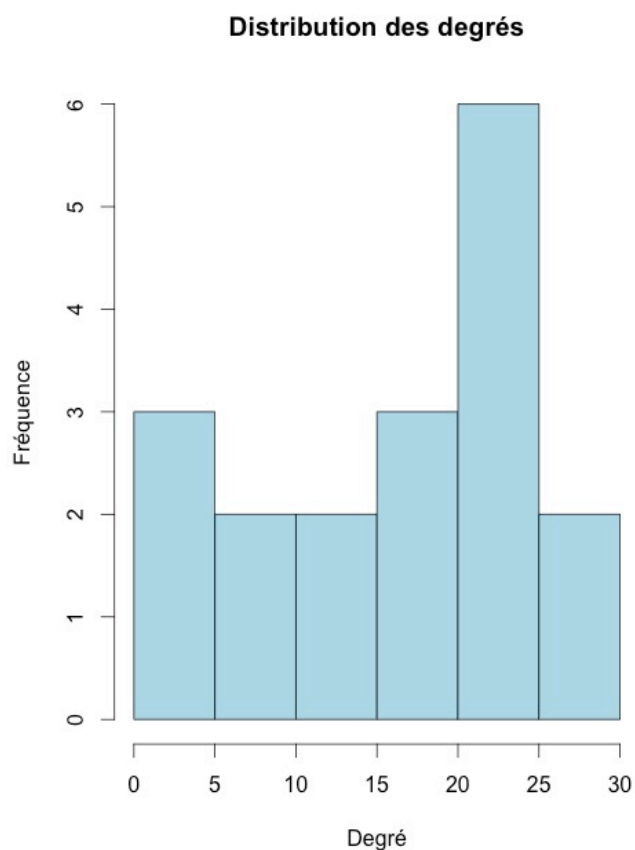
Annexe 12 : Degré, centralité d'intermédiation et de vecteur propre 2004



Annexe 13 : Distribution des degrés 2004

	Degré	Centralité d'intermédiation	Centralité de vecteur propre
AB.Inbev	22	5,38	0,89
Ackermans	22	7,63	0,86
Ageas	24	11,83	0,90
Befimmo	12	2,00	0,48
Bekaert	18	1,56	0,75
Cofinimmo	8	0,33	0,32
Colruyt	10	0,00	0,43
Delhaize	18	34,00	0,68
D.Ieteren	12	0,44	0,51
GBL	28	55,38	0,96
KBC	22	6,18	0,88
Solvay	24	22,02	0,89
UCB	18	1,56	0,75
Umicore	28	24,55	1,00
Proximus	22	7,14	0,86
Elia	2	0,00	0,07
Engie	2	0,00	0,09
Telenet	4	0,00	0,18
Somme	296		
Moyenne	16,44		

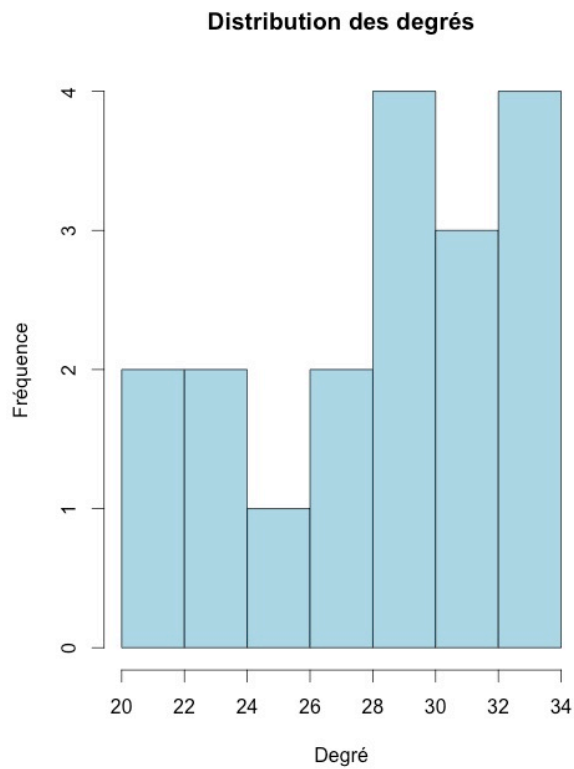
Annexe 14 : Degré, centralité d'intermédiation et de vecteur propre 2005



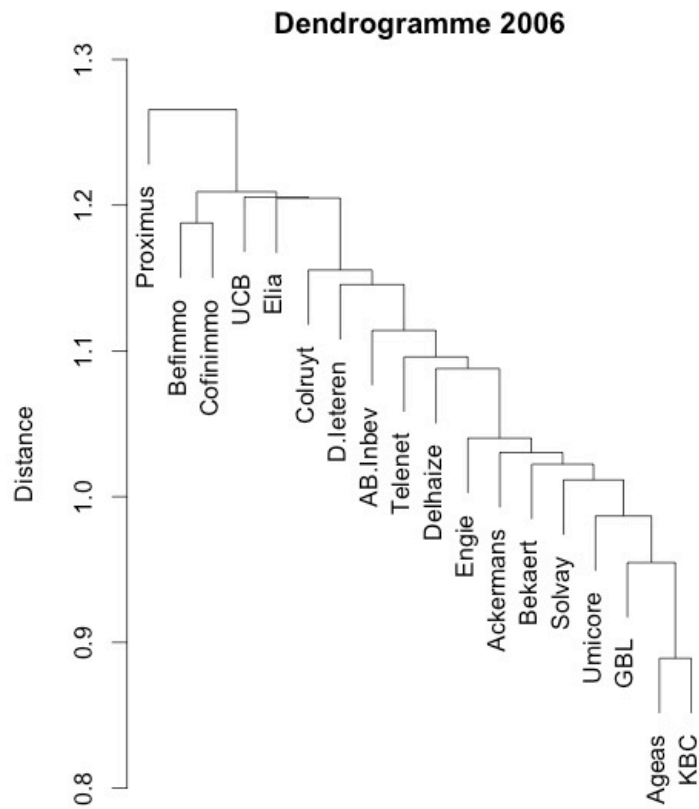
Annexe 15 : Distribution des degrés 2005

	Degré	Centralité d'intermédierité	Centralité de vecteur propre
AB.Inbev	28	1,56	0,86
Ackermans	34	4,58	1,00
Ageas	34	4,58	1,00
Befimmo	24	0,77	0,75
Bekaert	30	2,07	0,91
Cofinimmo	22	0,56	0,68
Colruyt	32	4,02	0,95
Delhaize	30	2,12	0,91
D.Ieteren	30	2,08	0,91
GBL	34	4,58	1,00
KBC	32	3,16	0,96
Solvay	34	4,58	1,00
UCB	26	1,36	0,80
Umicore	32	2,86	0,96
Proximus	20	0,31	0,63
Elia	24	0,75	0,75
Engie	30	2,07	0,91
Telenet	28	1,98	0,85
Somme	524		
Moyenne	29,11		

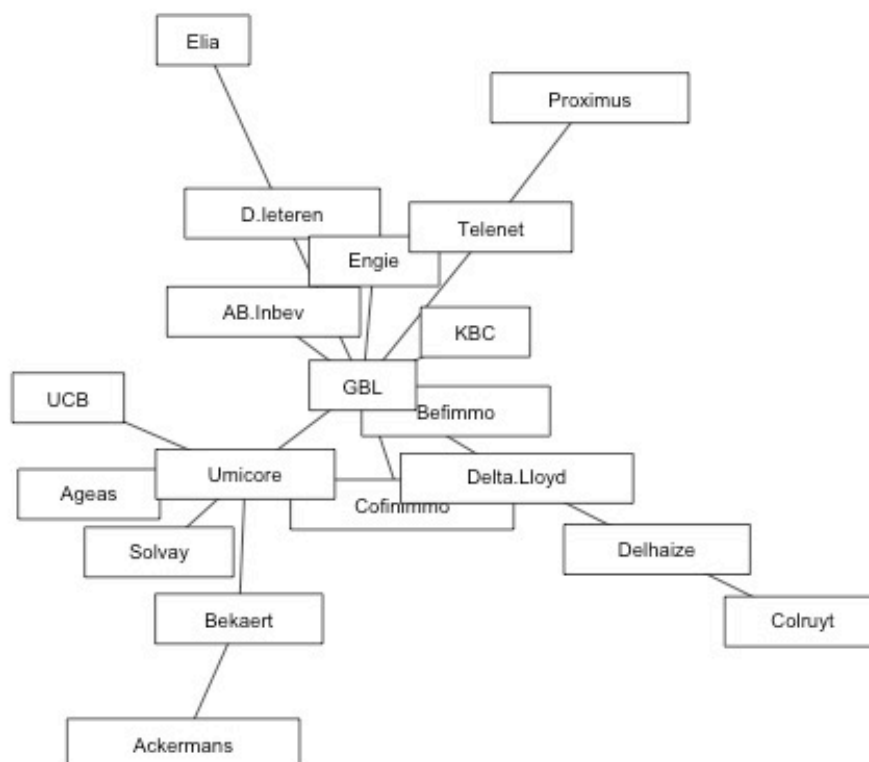
Annexe 16 : Degré, centralité d'intermédierité et de vecteur propre 2006



Annexe 17 : Distribution des degrés 2006



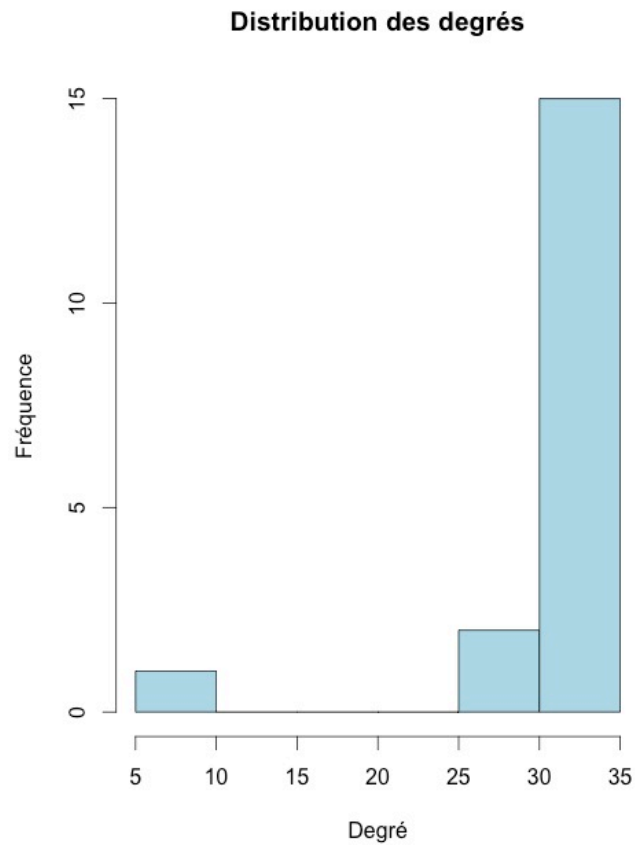
Annexe 18 : Dendrogramme 2006



Annexe 19 : Minimal spanning tree 2006

	Degré	Centralité d'intermédiation	Centralité de vecteur propre
AB.Inbev	32	0,13	0,99
Ackermans	32	0,13	0,99
Ageas	32	0,13	0,99
Befimmo	32	0,13	0,99
Bekaert	34	9,47	1,00
Cofinimmo	32	0,13	0,99
Colruyt	32	0,13	0,99
Delhaize	32	0,13	0,99
D.Ieteren	30	0,00	0,93
GBL	32	0,13	0,99
KBC	32	0,13	0,99
Solvay	34	9,47	1,00
UCB	32	0,13	0,99
Umicore	34	9,47	1,00
Proximus	32	0,13	0,99
Elia	6	0,00	0,19
Engie	32	0,13	0,99
Telenet	30	0,00	0,93
Somme	552		
Moyenne	30,67		

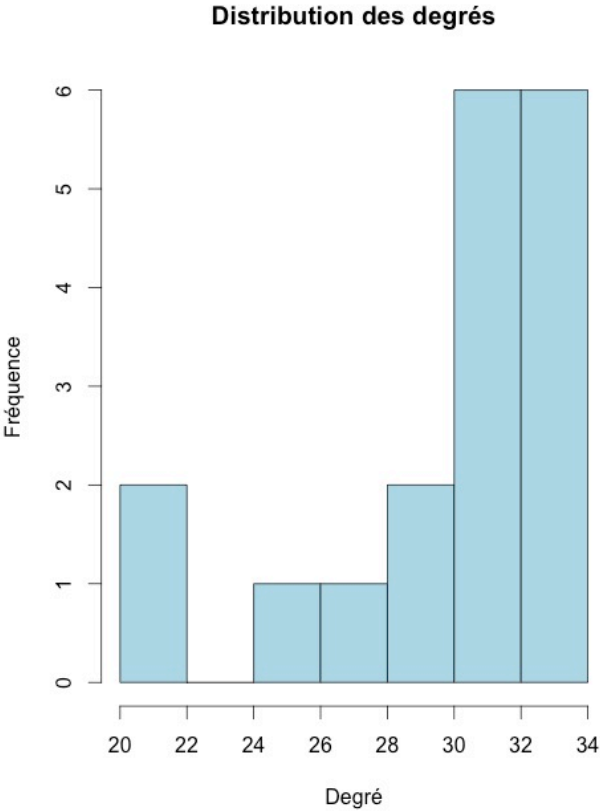
Annexe 20 : Degré, centralité d'intermédiation et de vecteur propre 2007



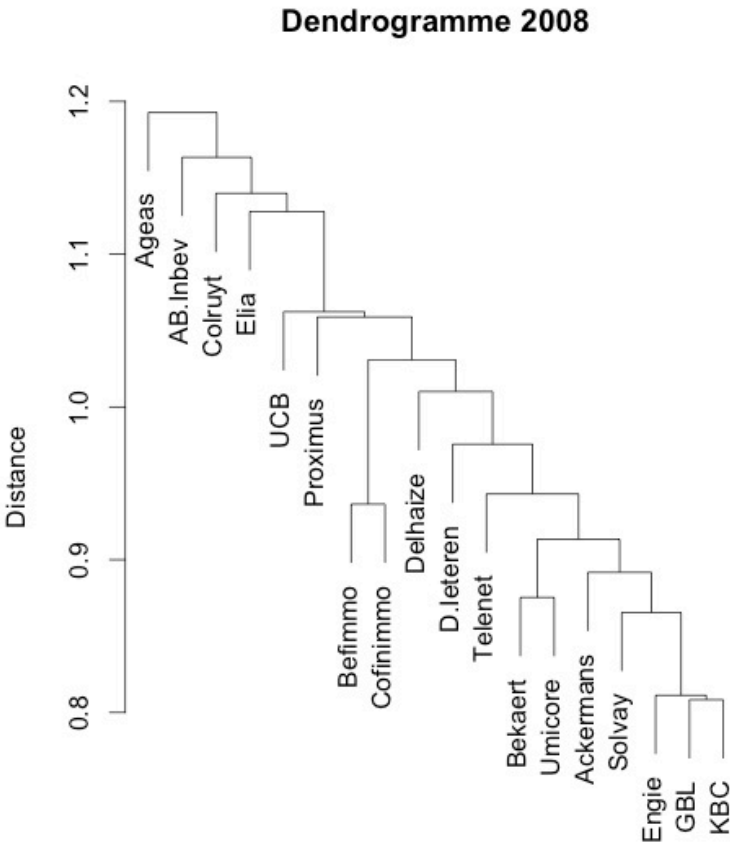
Annexe 21 : Distribution des degrés 2007

	Degré	Centralité d'intermédierité	Centralité de vecteur propre
AB.Inbev	30	1,23	0,90
Ackermans	32	1,66	0,96
Ageas	20	0,00	0,63
Befimmo	32	1,66	0,96
Bekaert	32	1,66	0,96
Cofinimmo	34	2,88	1,00
Colruyt	22	0,13	0,69
Delhaize	34	2,88	1,00
D.Ieteren	28	0,13	0,87
GBL	32	1,37	0,96
KBC	32	1,37	0,96
Solvay	34	2,88	1,00
UCB	34	2,88	1,00
Umicore	34	2,88	1,00
Proximus	32	2,52	0,95
Elia	26	0,13	0,81
Engie	34	2,88	1,00
Telenet	30	0,86	0,91
Somme	552		
Moyenne	30,67		

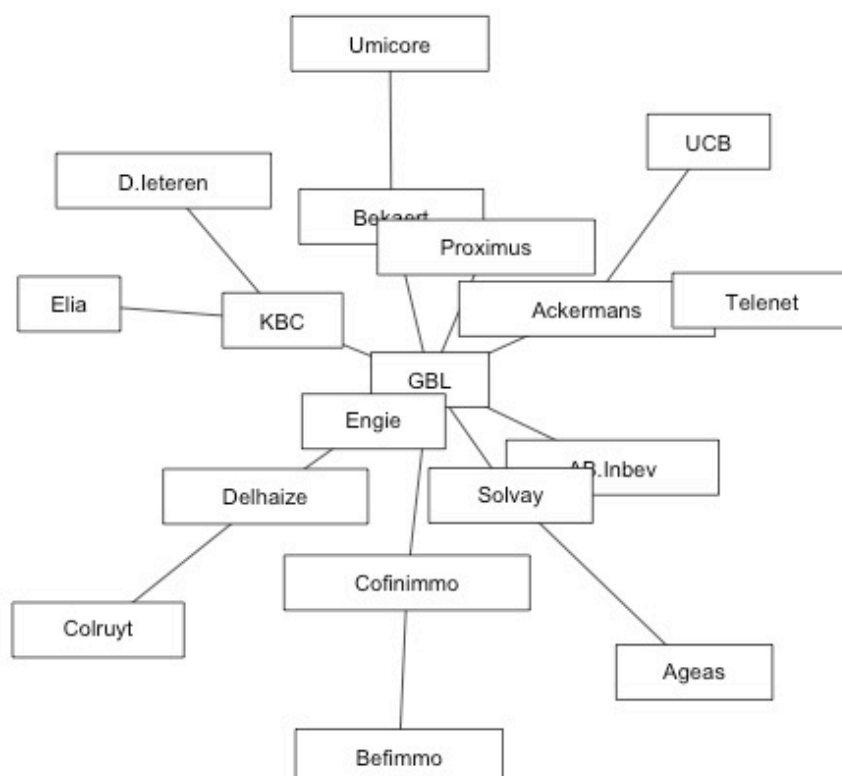
Annexe 22 : Degré, centralité d'intermédierité et de vecteur propre 2008



Annexe 23 : Distribution des degrés 2008



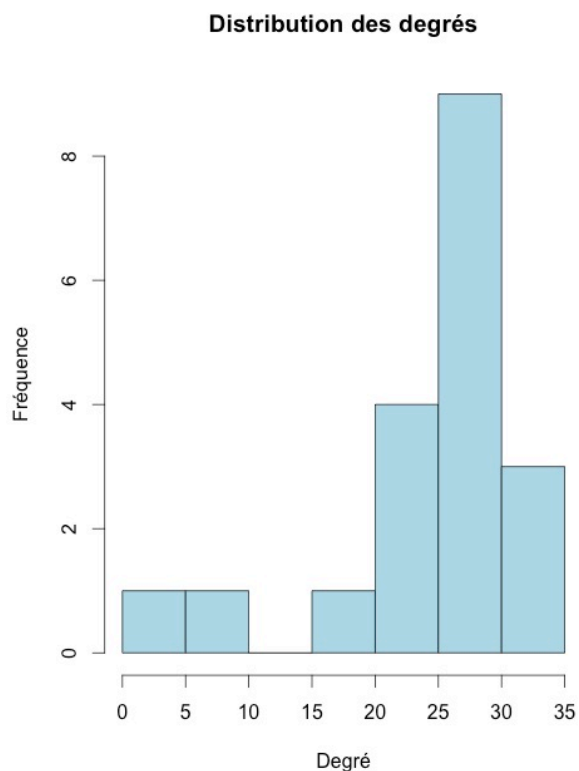
Annexe 24 : Dendrogramme 2008



Annexe 25 : Minimal spanning tree 2008

	Degré	Centralité d'intermédiation	Centralité de vecteur propre
AB.Inbev	30	9,29	0,93
Ackermans	32	5,38	1,00
Ageas	28	2,17	0,91
Befimmo	28	2,23	0,91
Bekaert	30	3,08	0,96
Cofinimmo	30	4,10	0,95
Colruyt	8	0,20	0,23
Delhaize	26	10,32	0,79
D.Ieteren	28	3,31	0,90
GBL	32	5,38	1,00
KBC	22	1,00	0,73
Solvay	32	5,38	1,00
UCB	22	0,35	0,75
Umicore	30	3,08	0,96
Proximus	24	5,33	0,76
Elia	0	0,00	0,00
Engie	30	4,56	0,95
Telenet	24	6,22	0,76
Delta.Lloyd	16	0,63	0,53
Somme	472		
Moyenne	24,84		

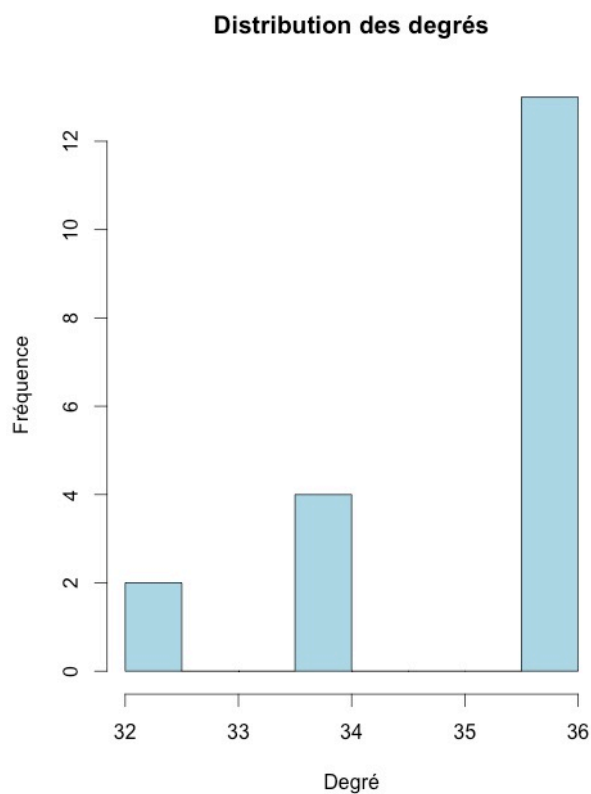
Annexe 26 : Degré, centralité d'intermédiation et de vecteur propre 2009



Annexe 27 : Distribution des degrés 2009

	Degré	Centralité d'intermédiation	Centralité de vecteur propre
AB.Inbev	36	0,50	1,00
Ackermans	36	0,50	1,00
Ageas	36	0,50	1,00
Befimmo	36	0,50	1,00
Bekaert	36	0,50	1,00
Cofinimmo	36	0,50	1,00
Colruyt	32	0,12	0,90
Delhaize	34	0,38	0,95
D.Ieteren	36	0,50	1,00
GBL	36	0,50	1,00
KBC	36	0,50	1,00
Solvay	36	0,50	1,00
UCB	34	0,24	0,95
Umicore	36	0,50	1,00
Proximus	36	0,50	1,00
Elia	32	0,12	0,90
Engie	36	0,50	1,00
Telenet	34	0,38	0,95
Delta.Lloyd	34	0,24	0,95
Somme	668		
Moyenne	35,16		

Annexe 28 : Degré, centralité d'intermédiation et de vecteur propre 2010



Annexe 29 : Distribution des degrés 2010

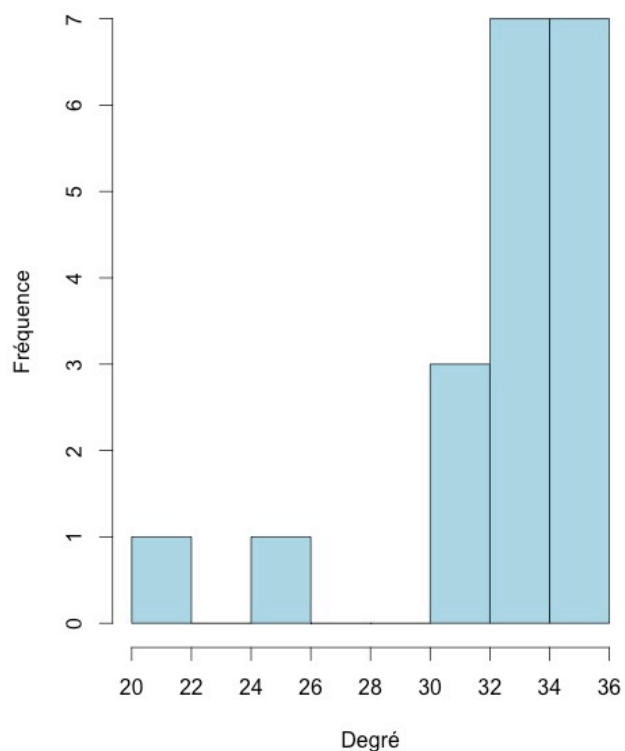
	Degré	Centralité d'intermédiation	Centralité de vecteur propre
AB.Inbev	36	0,00	1,00
Ackermans	36	0,00	1,00
Ageas	36	0,00	1,00
Befimmo	36	0,00	1,00
Bekaert	36	0,00	1,00
Cofinimmo	36	0,00	1,00
Colruyt	36	0,00	1,00
Delhaize	36	0,00	1,00
D.Ieteren	36	0,00	1,00
GBL	36	0,00	1,00
KBC	36	0,00	1,00
Solvay	36	0,00	1,00
UCB	36	0,00	1,00
Umicore	36	0,00	1,00
Proximus	36	0,00	1,00
Elia	36	0,00	1,00
Engie	36	0,00	1,00
Telenet	36	0,00	1,00
Delta.Lloyd	36	0,00	1,00
Somme	684		
Moyenne	36,00		

Annexe 30 : Degré, centralité d'intermédiation et de vecteur propre 2011

	Degré	Centralité d'intermédiation	Centralité de vecteur propre
AB.Inbev	32	1,20	0,91
Ackermans	36	2,47	1,00
Ageas	34	0,76	0,97
Befimmo	34	1,56	0,96
Bekaert	32	0,46	0,92
Cofinimmo	34	0,76	0,97
Colruyt	34	0,76	0,97
Delhaize	26	0,00	0,76
D.leteren	34	0,76	0,97
GBL	36	2,47	1,00
KBC	36	2,47	1,00
Solvay	34	0,76	0,97
UCB	34	1,56	0,96
Umicore	36	2,47	1,00
Proximus	36	2,47	1,00
Elia	20	0,00	0,58
Engie	36	2,47	1,00
Telenet	32	0,13	0,92
Delta.Lloyd	36	2,47	1,00
Somme	632		
Moyenne	33,26		

Annexe 31 : Degré, centralité d'intermédiation et de vecteur propre 2012

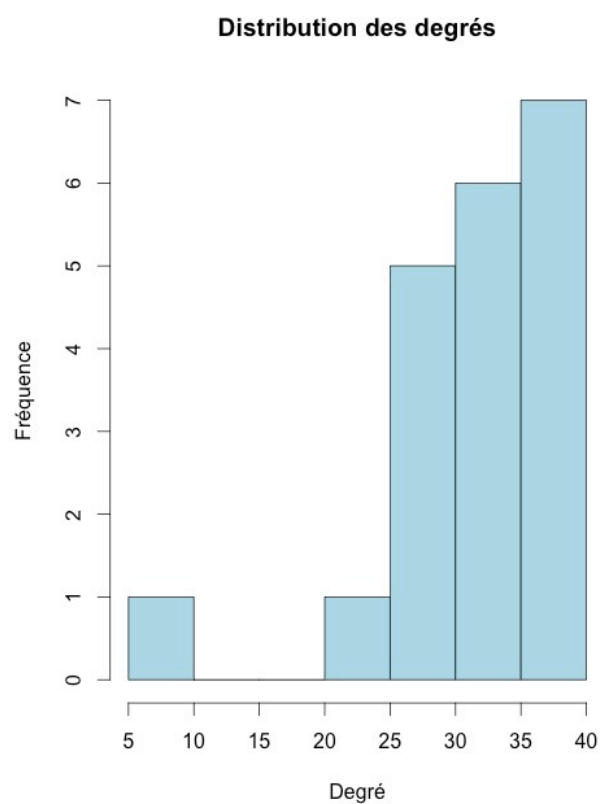
Distribution des degrés



Annexe 32 : Distribution des degrés 2012

	Degré	Centralité d'intermédiation	Centralité de vecteur propre
AB.Inbev	36	11,77	0,96
Ackermans	36	2,91	0,99
Ageas	34	1,77	0,95
Befimmo	30	0,60	0,86
Bekaert	28	1,02	0,79
Cofinimmo	38	13,91	1,00
Colruyt	34	2,02	0,95
Delhaize	36	2,91	0,99
D.leteren	26	0,00	0,76
GBL	36	2,91	0,99
KBC	34	2,02	0,95
Solvay	38	13,91	1,00
UCB	34	2,26	0,94
Umicore	32	1,50	0,90
Proximus	24	0,14	0,70
Elia	26	0,61	0,74
Engie	36	2,91	0,99
Telenet	30	0,82	0,85
Delta.Lloyd	34	2,02	0,95
Bpost	6	0,00	0,18
Somme	628		
Moyenne	31,40		

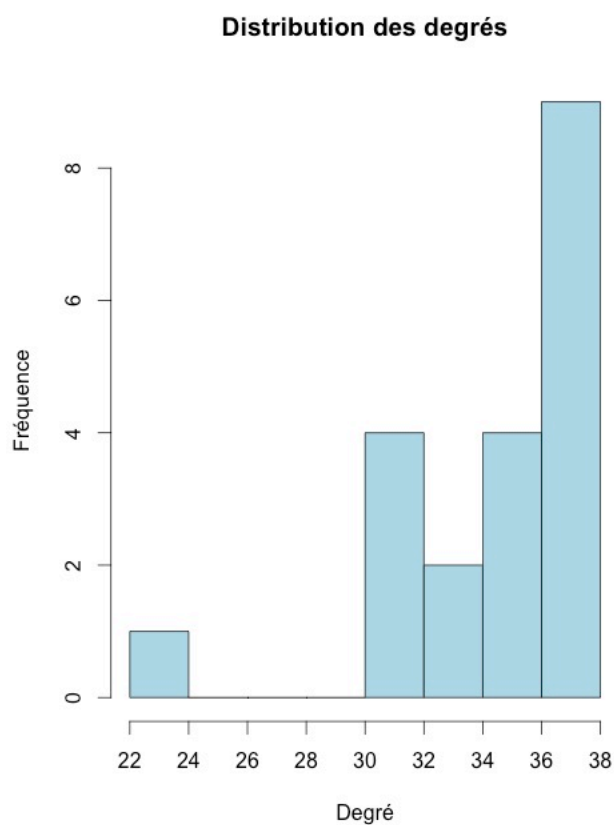
Annexe 33 : Degré, centralité d'intermédiation et de vecteur propre 2013



Annexe 34 : Distribution des degrés 2013

	Degré	Centralité d'intermédiation	Centralité de vecteur propre
AB.Inbev	38	2,26	1,00
Ackermans	38	2,26	1,00
Ageas	32	0,24	0,87
Befimmo	32	0,24	0,87
Bekaert	38	2,26	1,00
Cofinimmo	36	0,77	0,97
Colruyt	34	0,51	0,92
Delhaize	36	1,80	0,95
D.leteren	22	0,00	0,61
GBL	38	2,26	1,00
KBC	38	2,26	1,00
Solvay	38	2,26	1,00
UCB	32	0,38	0,87
Umicore	34	0,65	0,92
Proximus	36	1,94	0,95
Elia	38	2,26	1,00
Engie	36	0,77	0,97
Telenet	38	2,26	1,00
Delta.Lloyd	38	2,26	1,00
Bpost	32	0,38	0,87
Somme	704		
Moyenne	35,20		

Annexe 35 : Degré, centralité d'intermédiation et de vecteur propre 2014



Annexe 36 : Distribution des degrés 2014

2. Code R utilisé

```
#Importation de fichier txt avec les rendements en ln + attach

attach(Rendements)

##### 2000 #####
# 01/01/2000 à 12/12/2000 (ligne 1 à ligne 252 comprise)

# Note: AB.Inbev ne rentre en bourse que le 01/12/2000

#### Création de la matrice

mat2000=cbind(AB.Inbev[1:252],Ackermans[1:252],Ageas[1:252],Befimmo[1:252],Bekaert[1:252],Cofinimmo[1:252],Colruyt[1:252],Delhaize[1:252],D.Ieteren[1:252],GBL[1:252],KBC[1:252],Solvay[1:252],UCB[1:252],Umicore[1:252])

# Donner un nom aux colonnes de la matrice créée

colnames(mat2000)=c("AB.Inbev","Ackermans","Ageas","Befimmo","Bekaert","Cofinimmo","Colruyt","Delhaize","D.Ieteren","GBL","KBC","Solvay","UCB","Umicore")

# Obtenir la matrice de corrélation, le nombre d'observations ainsi que le test de corrélation

library("Hmisc")

cortest2000=rcorr(mat2000, type=c("pearson"))
cortest2000

# Sauvegrader la matrice de corrélation

cor2000=cortest2000$r
cor2000

# Obtenir une matrice d'adjacence à partir des P-valeurs du test de corrélation. Il est à noter que le test de corrélation teste
# si la corrélation est égale à 0 (H0) ou non. Si la P-valeur est supérieure à 0,05 (5%), H0 n'est pas rejetée et cela sera
# traduit par un 0 dans la matrice d'adjacence. Au contraire, si la P-valeur est inférieure au seuil de 5% l'hypothèse nulle
# est rejetée et se traduit par un 1 dans la matrice d'adjacence.

library("igraph")

adj2000=ifelse(cortest2000$P > 0.05, matricebinaire <- 0, matricebinaire <- 1)
diag(adj2000) <- 0
adj2000
```

```

reseau2000=graph.adjacency(adj2000)
plot(reseau2000,layout=layout.kamada.kawai, edge.arrow.size=0.1,
     vertex.label.dist=0.6,vertex.size=9) # Représentation du réseau

hist(degree(reseau2000), xlab="Degré", ylab="Fréquence", main="Distribution
des degrés", col="lightblue", yaxp=c(0,9,9)) # Distribution des degrés

betweenness(reseau2000) # Centralité d'intermédierité

evcent(reseau2000)$vector # Centralité de vecteur propre

# Obtenir la matrice de proximité (distance)

prox.function = function(x) {return(sqrt(2*(1-x)))} #création d'une fonction afin
de calculer la distance

prox.function(cor2000)
prox2000=as.dist(prox.function(cor2000) )

# Obtenir le dendrogramme

hclust(prox2000,method = "single")
plot(hclust(prox2000,method = "single"), sub="", xlab="", ylab="Distance",
     main="Dendrogramme 2000")

# Obtenir le minimum spanning tree

library(vegan)

spantree(prox2000)
plot(spantree(prox2000), type = "t", cex=0.7, axes=F, xlab="", ylab="")

# Le code R se répète pour les 14 autres années d'analyse

```