



(22) Date de dépôt/Filing Date: 2000/10/10

(41) Mise à la disp. pub./Open to Public Insp.: 2001/04/12

(45) Date de délivrance/Issue Date: 2010/06/15

(30) Priorité/Priority: 1999/10/12 (FR99/12798)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *C08F 4/58* (2006.01),  
*C08F 210/02* (2006.01), *C08F 236/06* (2006.01),  
*C08F 236/08* (2006.01), *C08L 23/08* (2006.01)

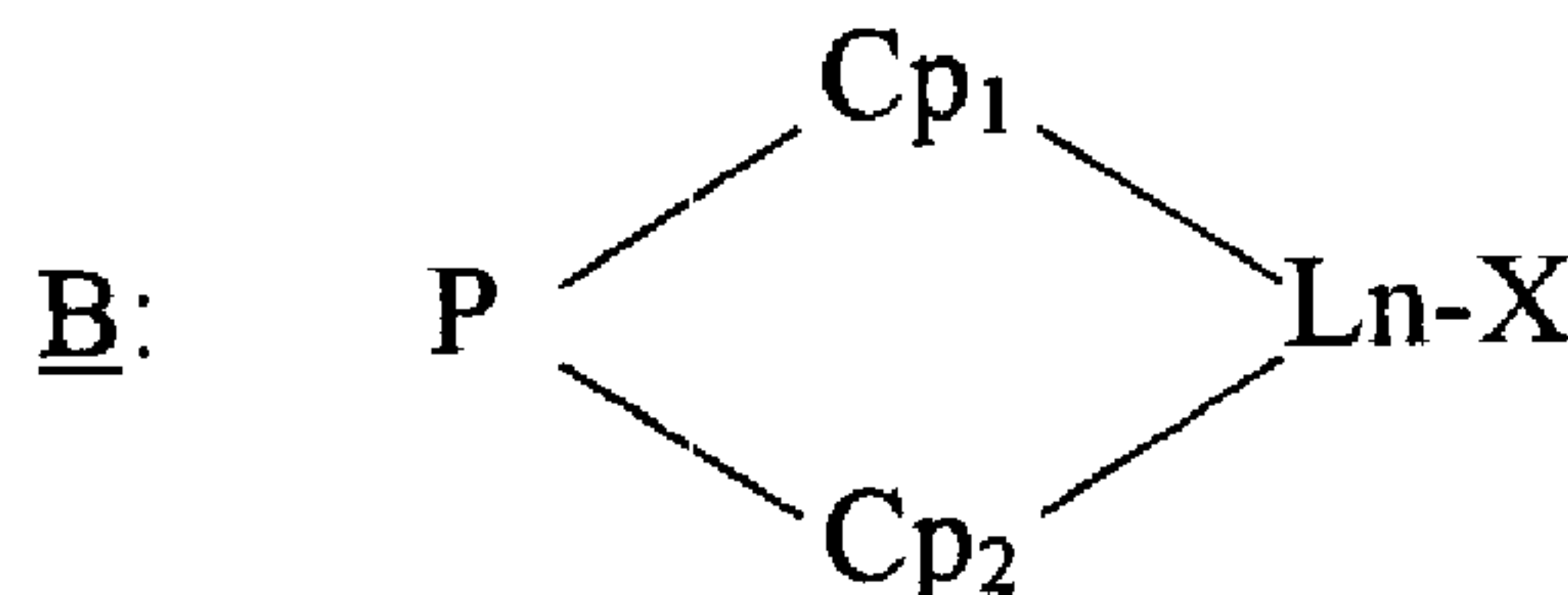
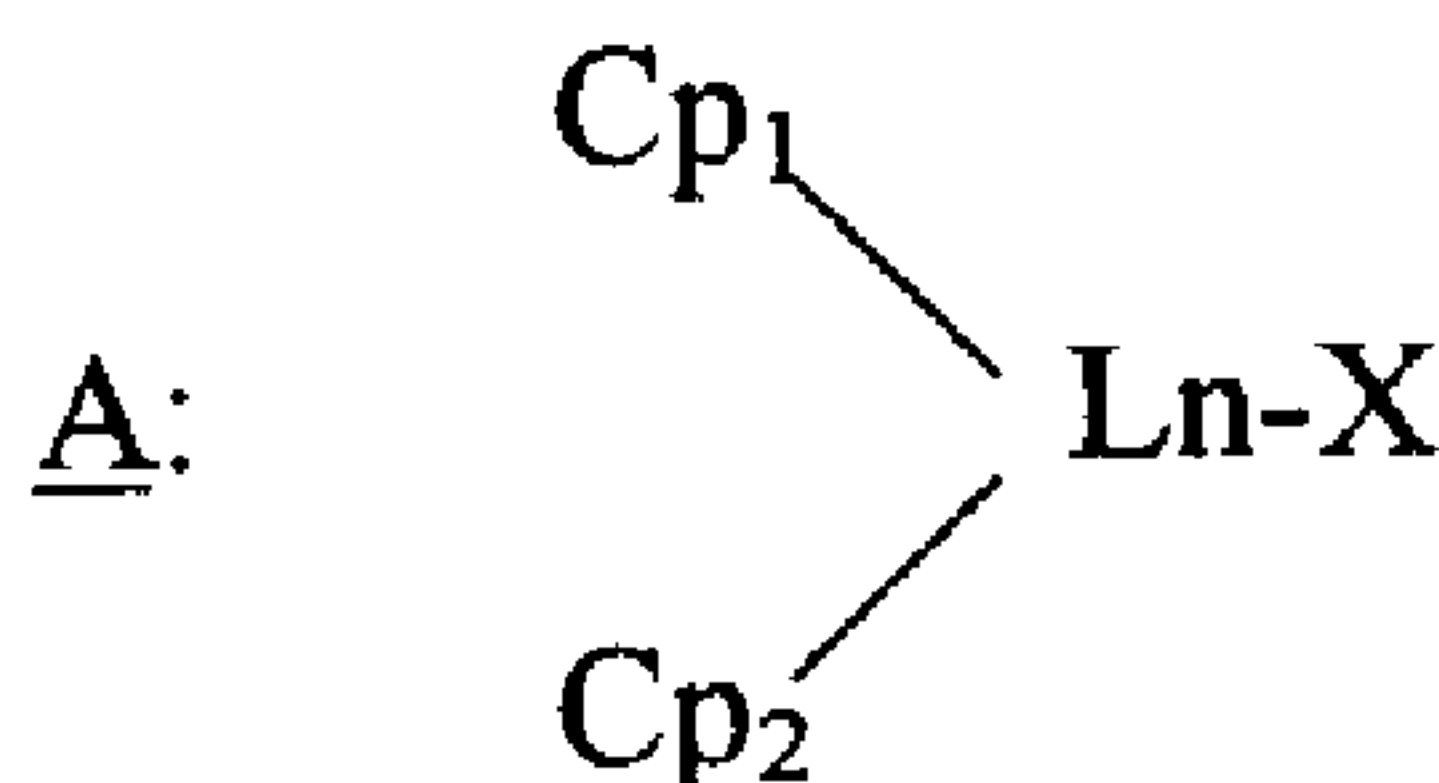
(72) Inventeurs/Inventors:  
BARBOTIN, FANNY, FR;  
BOISSON, CHRISTOPHE, FR;  
SPITZ, ROGER, FR

(73) Propriétaires/Owners:  
MICHELIN RECHERCHE ET TECHNIQUE S.A., CH;  
ATOFINA, FR

(74) Agent: ROBIC

(54) Titre : SYSTEME CATALYTIQUE, SON PROCEDE DE PREPARATION ET PROCEDE DE PREPARATION D'UN COPOLYMER D'ETHYLENE ET D'UN DIENE CONJUGUE

(54) Title: CATALYTIC SYSTEM, THE PROCEDURE FOR DEVELOPING IT AND THE PROCEDURE FOR DEVELOPING AN ETHYLENE COPOLYMER AND A CONJUGATE DIENE



(57) Abrégé/Abstract:

La présente invention concerne un système catalytique, son procédé de préparation et un procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué utilisant ce système catalytique. Un système catalytique selon l'invention comprend: - d'une part, un complexe organométallique représenté par l'une des formules génériques suivantes A ou B: (voir formule A), (voir formule B) où Ln représente un métal d'un lanthanide dont le numéro atomique peut aller de 57 à 71, où X représente un halogène pouvant être le chlore, le fluor, le brome ou l'iode, où Cp<sub>1</sub> et Cp<sub>2</sub> comprennent chacun un groupe cyclopentadiényle ou fluorényle qui est substitué ou non et où P est un pont répondant à la formule MR<sub>2</sub>, où M est un élément de la colonne IVA de la classification périodique de Mendeleev, et où R est un groupe alkyle comprenant de 1 à 20 atomes de carbone, et - d'autre part, un co-catalyseur qui est choisi parmi un groupe comprenant un alkyl magnésium, un alkyl lithium, un alkyl aluminium, ou un réactif de Grignard, ou qui est constitué d'un mélange de ces constituants.

**ABREGE**

La présente invention concerne un système catalytique, son procédé de préparation et un procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué utilisant ce système catalytique. Un système catalytique selon l'invention comprend:

- d'une part, un complexe organométallique représenté par l'une des formules génériques suivantes A ou B:



où Ln représente un métal d'un lanthanide dont le numéro atomique peut aller de 57 à 71,

où X représente un halogène pouvant être le chlore, le fluor, le brome ou l'iode,

où Cp<sub>1</sub> et Cp<sub>2</sub> comprennent chacun un groupe cyclopentadiényle ou fluorényle qui est substitué ou non et où P est un pont répondant à la formule MR<sub>2</sub>, où M est un élément de la colonne IVA de la classification périodique de Mendeleev, et où R est un groupe alkyle comprenant de 1 à 20 atomes de carbone, et

- d'autre part, un co-catalyseur qui est choisi parmi un groupe comprenant un alkyl magnésium, un alkyl lithium, un alkyl aluminium, ou un réactif de Grignard, ou qui est constitué d'un mélange de ces constituants.

# SYSTEME CATALYTIQUE, SON PROCEDE DE PREPARATION ET PROCEDE DE PREPARATION D'UN COPOLYMERE D'ETHYLENE ET D'UN DIENE CONJUGUE

## DOMAINE DE L'INVENTION

La présente invention concerne un système catalytique utilisable pour la copolymérisation de l'éthylène et d'un diène conjugué, un procédé de préparation de ce système catalytique, et un procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué consistant à utiliser ledit système catalytique.

## DESCRIPTION DE L'ART ANTÉRIEUR

Il est connu de polymériser l'éthylène au moyen de certains complexes à base de lanthanides. Ces catalyseurs peuvent être utilisés sur une large gamme de pression et de température, avantageusement à pression réduite et à une température proche de l'ambiante pour la polymérisation de l'éthylène.

Les premiers complexes à base de lanthanides qui ont été décrits dans la littérature sont des complexes alkylés. En particulier, Ballard et al. ont décrit dans J. Chem. Soc., Chem. Comm. pp. 994-995 (1978) la polymérisation de l'éthylène au moyen d'un complexe répondant à la formule  $[(C_5H_5)_2ErMe]_2$  (où Me est un groupe méthyl).

Ces complexes alkylés peuvent atteindre des activités instantanées qui sont très élevées, comme cela est décrit dans le document de brevet américain US-A-4 716 257, en référence à un complexe analogue répondant à la formule  $[(C_5Me_5)_2LnH]_2$  (où Ln représente un lanthanide).

Cependant, un inconvénient majeur de ces complexes alkylés est qu'ils se désactivent très rapidement.

Un autre inconvénient réside dans la relative complexité de leur synthèse.

Pour pallier ces inconvénients, on a cherché à développer des complexes non alkylés à base de lanthanides. Ces complexes possèdent une liaison métal-halogène, et ils sont alkylés dans le milieu de polymérisation. Le document de brevet américain US-A-5 109 085 décrit la polymérisation de l'éthylène avec des complexes de formule  $C_pLnX_{4-n}M'Lx$  (où L est une molécule complexante et où x est un entier égal ou supérieur à 1), qui sont additionnés d'un ou plusieurs co-catalyseurs. Ce document évoque par ailleurs la possibilité de copolymériser l'éthylène et le butadiène avec ce même complexe.

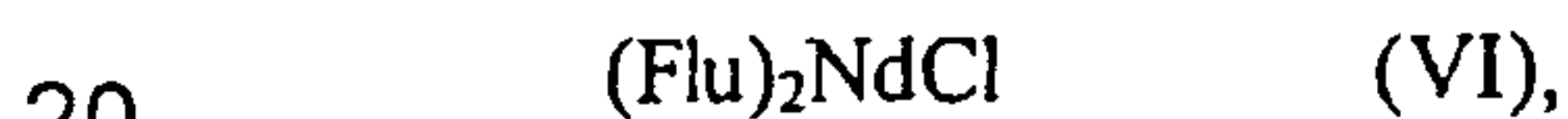


Ce type de complexe non alkylé comporte ainsi dans son environnement une ou plusieurs molécules complexantes L, qui peuvent par exemple être constituées de tétrahydrofurane ou d'éther diéthylique, et qui sont ajoutées pour des raisons de synthèse organométallique.

Or, il s'avère que ces molécules complexantes peuvent entrer en compétition avec le monomère éthylénique lors de la complexation sur le lanthanide, avec comme conséquence indésirable une limitation de l'activité catalytique et donc du rendement de la polymérisation.

Par ailleurs, l'article chinois de Cui, Li Qiang et al: « Preliminary investigations on polymerization catalysts composed of lanthanocene and methyl aluminoxane », Polymer Bulletin 10 (Berlin), 1998, 40(6), pp. 729-734, présente un système catalytique prévu pour l'homopolymérisation de l'isoprène, du butadiène, ou du styrène. Ce système catalytique comprend:

-un complexe organométallique de terre rare répondant à l'une ou l'autre des formules suivantes:



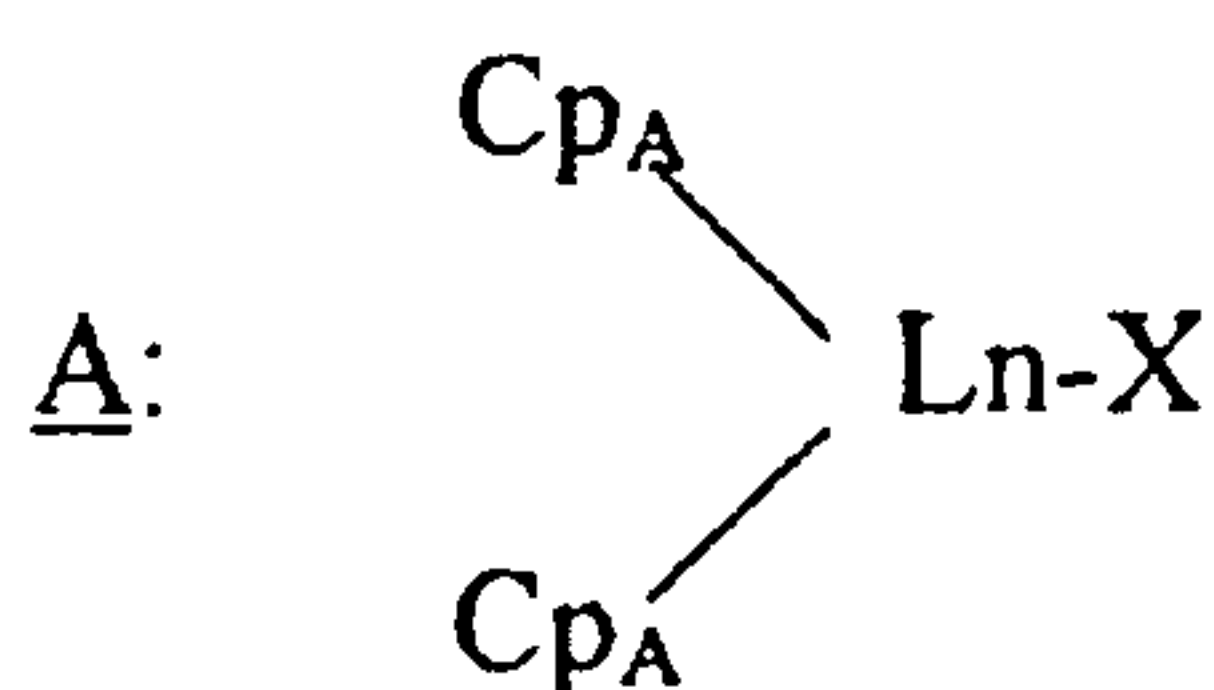
où Cp, Ind et Flu sont respectivement des groupes cyclopentadiényle, indényle et fluorényle et OAr' est un groupe phénoxy; et

- un co-catalyseur constitué de méthylaluminoxane, testé en comparaison d'un co-catalyseur constitué d'un alkyl aluminium.

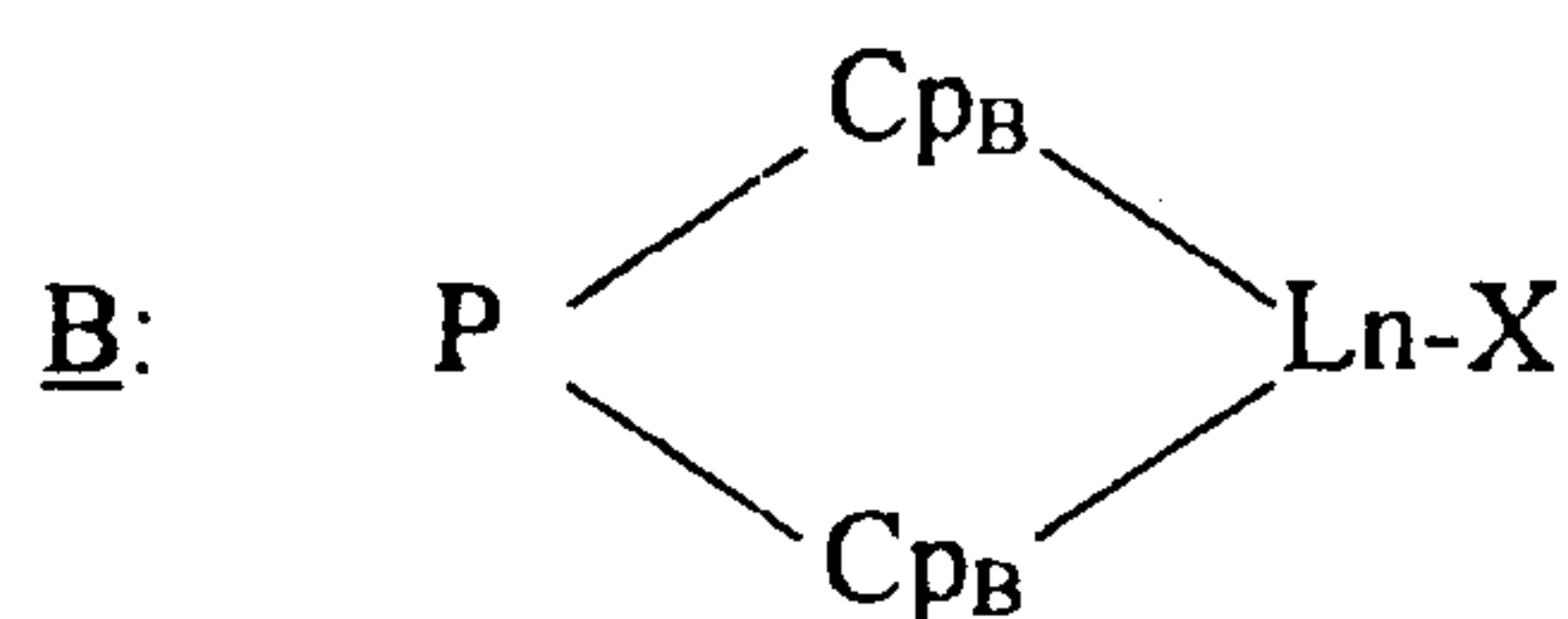
## SOMMAIRE DE L'INVENTION

La présente invention a pour objet un système catalytique de polymérisation comprenant:

30 - d'une part, un complexe organométallique représenté par l'une des formules génériques suivantes A ou B:



,



où Ln représente un métal d'un lanthanide dont le numéro atomique varie de 57 à 71,

## 2a

où X représente un halogène,

où, dans la formule A, sont reliées audit métal Ln deux molécules de ligands  $Cp_A$  constituées chacune d'un groupe cyclopentadiényle qui est substitué,

où, dans la formule B, est reliée audit métal Ln une molécule de ligand, constituée de deux groupes  $Cp_B$  cyclopentadiényle ou fluorényle qui sont substitués ou non et qui sont reliés entre eux par un pont P répondant à la formule  $MR_2$ , où M est un élément de la colonne IVA de la classification périodique de Mendeleev, et où R est un groupe alkyle comprenant de 1 à 20 atomes de carbone,

et

- d'autre part, un co-catalyseur qui est choisi parmi un alkyl magnésium, un alkyl lithium, un alkyl aluminium, et un réactif de Grignard, ou qui est constitué d'un mélange de ces constituants,

caractérisé en ce que, Me représentant un groupe méthyle:

dans ladite formule générique A,  $Cp_A$  est constitué d'un groupe cyclopentadiényle qui est substitué par un radical alkyl silyl répondant à la formule  $(C_5H_4)(SiMe_3)$  et en ce que,

dans ladite formule générique B,  $Cp_B$  est constitué d'un groupe cyclopentadiényle qui est substitué par un radical alkyl silyl répondant à la formule  $(C_5H_3)(SiMe_3)$ , ou d'un groupe fluorényle non substitué répondant à la formule  $C_{13}H_8$ .

La présente invention concerne également un procédé de préparation d'un système catalytique tel que défini précédemment, caractérisé en ce qu'il consiste, dans un premier temps, à préparer ledit complexe organométallique

- dans une première étape, en faisant réagir avec un alkyl lithium une molécule hydrogénée de ligand, représentée par la formule  $HCp$ , pour obtenir un sel de lithium,

- dans une seconde étape, en faisant réagir dans un solvant complexant ledit sel avec un trihalogénure anhydre dudit lanthanide qui est représenté par la formule  $LnX_3$ , où X représente un halogène,

2b

- dans une troisième étape, en évaporant ledit solvant complexant, puis en procédant dans un solvant non complexant à l'extraction du produit obtenu au terme de ladite seconde étape, et éventuellement,

- dans une quatrième étape, en procédant à la cristallisation du produit extrait au terme de ladite troisième étape, pour obtenir ledit complexe organométallique qui soit totalement exempt dudit solvant complexant,

et, dans un second temps, à adjoindre ledit co-catalyseur audit complexe organométallique ainsi préparé.

10 La présente invention a également pour objet un procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué, consistant à faire réagir un système catalytique dans un solvant hydrocarboné inerte en présence de l'éthylène et du diène conjugué, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser un système catalytique comprenant:

- d'une part, un complexe organométallique représenté par l'une des formules génériques suivantes A' ou B':



où Ln représente un métal d'un lanthanide dont le numéro atomique varie de 57 à 71,

où X représente un halogène,

20 où, dans la formule A', sont reliées audit métal Ln deux molécules de ligands Cp<sub>1</sub> et Cp<sub>2</sub> identiques ou différentes, constituées chacune d'un groupe cyclopentadiényle ou fluorényle qui est substitué ou non,

où, dans la formule B', est reliée audit métal Ln une molécule de ligand, constituée de deux groupes cyclopentadiényle ou fluorényle Cp<sub>1</sub> et Cp<sub>2</sub> qui sont substitués ou non et qui sont reliés entre eux par un pont P répondant à la formule MR<sub>2</sub>, où M est un élément de la colonne IVA de la classification périodique de Mendeleev, et où R est un groupe alkyle comprenant de 1 à 20 atomes de carbone,

et

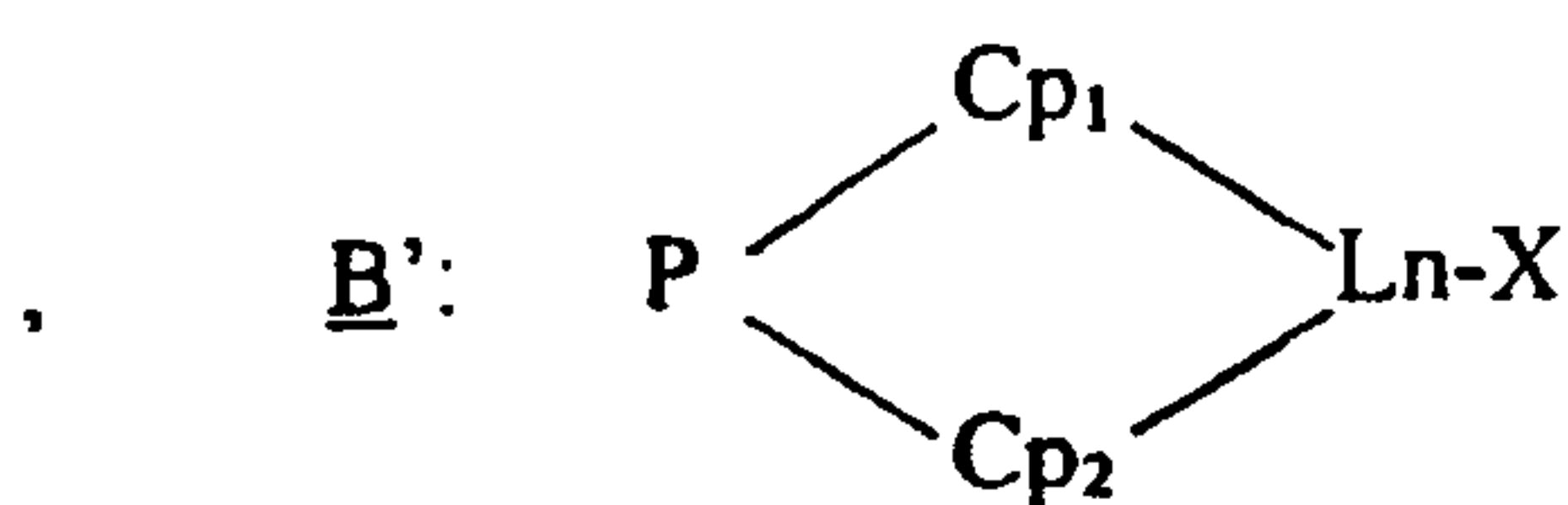
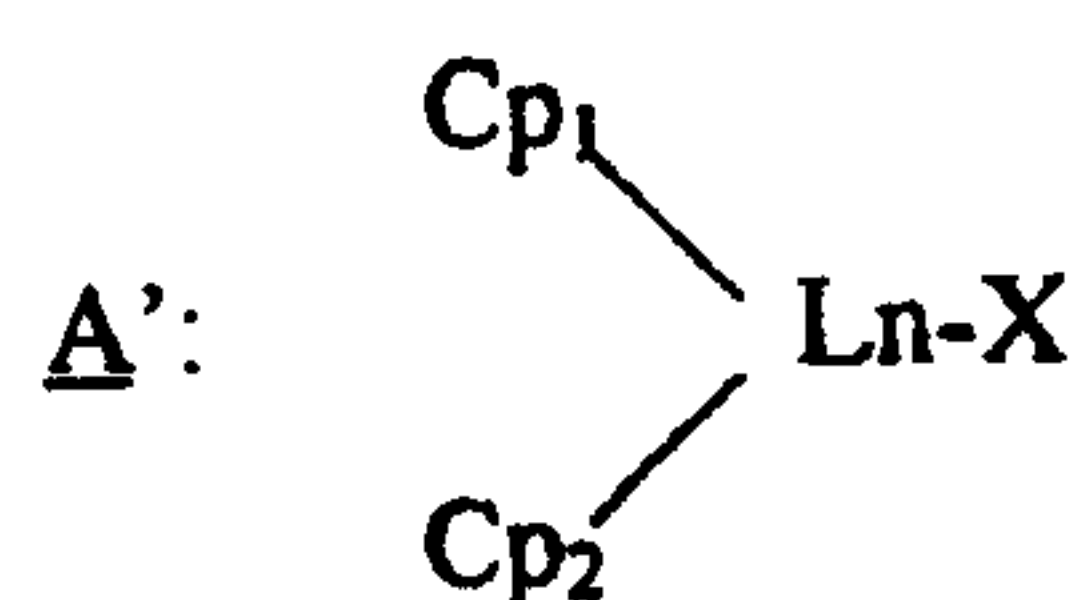


2c

- d'autre part, un co-catalyseur qui est choisi parmi un alkyl magnésium, un alkyl lithium, un alkyl aluminium, et un réactif de Grignard, ou qui est constitué d'un mélange de ces constituants.

### DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE L'INVENTION

Pour la copolymérisation de l'éthylène et d'un diène conjugué, la demanderesse a découvert d'une manière surprenante que l'association à un co-catalyseur choisi parmi un groupe comprenant un alkyl magnésium, un alkyl lithium, un alkyl aluminium, un réactif de Grignard ou un mélange de ces constituants, d'un complexe organométallique représenté par l'une des formules génériques suivantes A' ou B':



où Ln représente un métal d'un lanthanide dont le numéro atomique peut aller de 57 à 71, où X représente un halogène pouvant être le chlore, le fluor, le brome ou l'iode,

20

où, dans la formule A', sont reliées audit métal Ln deux molécules de ligands Cp<sub>1</sub> et Cp<sub>2</sub> identiques ou différentes, constituées chacune d'un groupe cyclopentadiényle ou fluorényle qui est substitué ou non,

où, dans la formule B', est reliée audit métal Ln une molécule de ligand, constituée de deux groupes cyclopentadiényle ou fluorényle Cp<sub>1</sub> et Cp<sub>2</sub> qui sont substitués ou non et qui sont reliés entre eux par un pont P répondant à la formule MR<sub>2</sub>, où M est un élément de la colonne IVA de la classification périodique de Mendeleev, par exemple le silicium, et où R est un groupe alkyle comprenant de 1 à 20 atomes de carbone,

permet de remédier à l'inconvénient précité qui est inhérent aux complexes non alkylés à base de lanthanides qui comprennent des molécules complexantes, et donc d'obtenir un rendement de polymérisation satisfaisant.

De préférence, ledit complexe organométallique est tel que le lanthanide Ln est le néodyme.

A titre préférentiel, Cp<sub>1</sub> et Cp<sub>2</sub> sont identiques, et chacun d'eux comprend un groupe cyclopentadiényle.

A titre encore plus préférentiel, Cp<sub>1</sub> et Cp<sub>2</sub> sont chacun constitués d'un groupe cyclopentadiényle qui est substitué par un radical alkyl ou alkyl silyl.

Dans le cas d'une substitution par un radical alkyl silyl, Cp<sub>1</sub> et Cp<sub>2</sub> répondent chacun par exemple à la formule Cp<sub>A</sub>=(C<sub>5</sub>H<sub>4</sub>)(SiMe<sub>3</sub>) pour ladite formule générique A', ou bien à la formule Cp<sub>B</sub>=(C<sub>5</sub>H<sub>3</sub>)(SiMe<sub>3</sub>) pour ladite formule générique B' (Me représentant un groupe méthyle). Le complexe organométallique répond alors à la formule particulière A ou B ci-après, selon le cas.



Dans la formule particulière A, sont donc reliées audit métal Ln deux molécules de ligands Cp<sub>A</sub> répondant chacune à la formule (C<sub>5</sub>H<sub>4</sub>)(SiMe<sub>3</sub>) et, dans la formule particulière B, est donc reliée audit métal Ln une molécule de ligand, constituée de deux groupes Cp<sub>B</sub> qui sont reliés entre eux par



ledit pont P,  $Cp_B$  étant constitué d'un groupe cyclopentadiényle qui est substitué par un radical alkyl silyl répondant à la formule  $(C_5H_3)(SiMe_3)$ .

Selon une variante de réalisation de l'invention où  $Cp_1$  et  $Cp_2$  sont identiques, chacun d'eux comprend un groupe fluorényle non substitué qui répond à la formule  $C_{13}H_9$ , pour ladite formule générique A', ou bien qui répond à la formule  $C_{13}H_8$ , pour ladite formule générique B'. Dans ce dernier cas, à la formule B' correspond la formule particulière B précitée, dans laquelle  $Cp_B = C_{13}H_8$ .

Dans le cas où  $Cp_1 = Cp_2 = Cp$ , ledit complexe organométallique est préparé

- dans une première étape, en faisant réagir avec un alkyl lithium une molécule hydrogénée de ligand, représentée par la formule  $HCp$ , pour obtenir un sel de lithium,

- dans une seconde étape, en faisant réagir dans un solvant complexant ledit sel avec un trihalogénure anhydre d'un lanthanide qui est représenté par la formule  $LnX_3$ , où X représente un halogène pouvant être le chlore, le fluor, le brome, ou l'iode,

- dans une troisième étape, en évaporant ledit solvant complexant, puis en procédant dans un solvant non complexant à l'extraction du produit obtenu au terme de ladite seconde étape, et éventuellement,

- dans une quatrième étape, en procédant à la cristallisation du produit extrait au terme de ladite troisième étape, pour obtenir ledit complexe organométallique répondant auxdites formules A ou B qui soit totalement exempt dudit solvant complexant.

Pour ladite première étape, on utilise de préférence à titre d'alkyl lithium le butyl lithium.

Pour ladite seconde étape, on utilise de préférence à titre de solvant complexant le tétrahydrofuranne. De plus, on fait réagir avantageusement deux moles dudit sel de lithium avec une ou deux moles dudit trihalogénure de lanthanide.

Pour ladite troisième étape, on utilise de préférence à titre de solvant non complexant le toluène ou l'heptane.

Quant audit co-catalyseur, dans le cas où il est constitué d'un mélange d'un alkyl aluminium et d'un alkyl lithium, ces deux constituants sont avantageusement présents en quantités stoechiométriques ou proches de la stoechiométrie dans ledit mélange, pour l'obtention d'une activité catalytique satisfaisante.

Pour ce co-catalyseur, on utilise avantageusement le butyloctyl magnésium à titre d'alkyl magnésium, le butyl lithium à titre d'alkyl lithium, l'hydruure de diisobutyl aluminium à titre d'alkyl aluminium, et le chlorure de butyl magnésium à titre de réactif de Grignard.

5 Un procédé de préparation selon l'invention de copolymères d'éthylène et d'un diène conjugué est tel qu'il consiste à faire réagir, dans un solvant hydrocarboné inerte et en présence de l'éthylène et du diène conjugué, ledit complexe organométallique avec ledit co-catalyseur.

10 On peut par exemple utiliser à titre de diène conjugué le 1, 3-butadiène, le 2-méthyl 1, 3-butadiène (respectivement appelés butadiène et isoprène dans la suite de la présente description), les 2, 3-di (alcoyle en C1 à C5) 1, 3-butadiène tels que par exemple le 2, 3 diméthyl-1, 3-butadiène, le 2, 3-diéthyl-1, 3-butadiène, le 2-méthyl 3-éthyl 1, 3-butadiène, le 2-méthyl 3-isopropyl 1, 3-butadiène, le phényl 1, 3-butadiène, le 1, 3-pentadiène, le 2, 4-hexadiène, ou tout autre diène conjugué ayant entre 4 et 8 atomes de carbone.

15

La réaction mise en oeuvre dans ce procédé peut être réalisée en suspension ou en solution, sous une pression variable, et à une température comprise entre -20° C et 220° C, de préférence comprise entre 20° C et 90° C.

20 Le rapport du nombre de moles dudit co-catalyseur sur le nombre de moles dudit complexe organométallique est choisi égal ou supérieur à 1 et, de préférence, il peut aller de 2 à 100.

La concentration en lanthanide du milieu réactionnel est avantageusement inférieure à 0,3 mmol/l.

Quant à la fraction molaire de butadiène dans ce milieu réactionnel, elle est avantageusement comprise entre 1 % et 80 %.

25

Le copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué qui est obtenu par ce procédé peut présenter les caractéristiques de microstructure suivantes, en fonction du complexe organométallique utilisé pour le système catalytique.

30 - Si l'on utilise le butadiène à titre de premier exemple de diène conjugué, alors le copolymère obtenu pourra présenter les enchaînements de chaîne suivants pour les unités butadiène qui sont insérées dans ce copolymère:



1, 4 cis; 1, 4 trans; 1, 2 ou sous la forme de trans 1, 2 cyclohexane.

Plus précisément, si l'on utilise en outre à titre de complexe organométallique un complexe répondant à l'une des formules  $[(C_5H_4)SiMe_3]_2NdCl$ ,  $\{[(C_5H_3)SiMe_3]_2SiMe_2\}NdCl$  ou  $(C_{13}H_9)_2NdCl$ , alors le butadiène sera majoritairement inséré dans la chaîne du copolymère par des enchaînements 1, 4 trans.

Et si l'on utilise un complexe répondant à la formule  $[(C_{13}H_8)_2SiMe_2]NdCl$ , alors le butadiène sera majoritairement inséré dans la chaîne du copolymère par des enchaînements trans 1, 2 cyclohexane.

- Si l'on utilise l'isoprène à titre de second exemple de diène conjugué, alors le copolymère obtenu pourra présenter les enchaînements de chaîne suivants pour les unités isoprène qui sont insérées dans ce copolymère:

1, 4; 1, 2 ou 3, 4.

Plus précisément, si l'on utilise en outre à titre de complexe organométallique un complexe répondant à la formule  $[(C_5H_4)SiMe_3]_2NdCl$ , alors l'isoprène sera majoritairement inséré dans la chaîne du copolymère par des enchaînements 1, 4.

Et si l'on utilise un complexe répondant à la formule  $[(C_{13}H_8)_2SiMe_2]NdCl$ , alors l'isoprène sera majoritairement inséré dans la chaîne du copolymère par des enchaînements 3, 4.

Selon une autre caractéristique des copolymères d'éthylène et de butadiène obtenus par le procédé selon l'invention, ces copolymères présentent une statistique d'enchaînement "éthylène-butadiène" qui est essentiellement du type alternée lorsqu'on utilise un complexe organométallique répondant à la formule  $[(C_5H_4)SiMe_3]_2NdCl$  ou à la formule  $\{[(C_5H_3)SiMe_3]_2SiMe_2\}NdCl$ , alors que cette statistique d'enchaînement est essentiellement du type à blocs lorsqu'on utilise un complexe de formule  $(C_{13}H_9)_2NdCl$ .

Les caractéristiques précitées de la présente invention, ainsi que d'autres, seront mieux comprises à la lecture de la description suivante de plusieurs exemples de réalisation de l'invention, donnés à titre illustratif et non limitatif, en comparaison d'un dernier exemple illustrant un état antérieur de la technique.



Pour tous les exemples suivants, on a opéré sous argon et on a préalablement séché les solvants utilisés par distillation, ou bien sur un tamis moléculaire de 3 Å sous balayage d'argon.

On a déterminé, pour chacun des copolymères obtenus dans ces exemples, la microstructure de ces copolymères, d'une part, par les techniques de RMN<sup>1</sup>H et, d'autre part, par la technique RMN<sup>13</sup>C. On a utilisé à cet effet un spectromètre commercialisé sous la dénomination "BRUKER\*", à des fréquences de 400 MHz pour la technique de RMN<sup>1</sup>H et de 100,6 MHz pour la technique de RMN<sup>13</sup>C.

On a détaillé à l'annexe I la méthode utilisée pour la détermination de cette microstructure.

10

#### EXEMPLE 1:

Système catalytique comprenant un complexe organométallique neutre et non ponté:  
le chloro bis( $\eta^5$ -triméthylsilylcyclopentadiényl) néodyme,  
répondant à la formule  $[(C_5H_4)SiMe_3]_2NdCl$  (formule générique « A » précitée).

15

#### - Synthèse d'un sel de formule $Li[(C_5H_4)SiMe_3]$ :

On introduit dans un tube de Schlenk 20 mmol d'un composé de formule  $(C_5H_5)SiMe_3$  et 80 ml d'heptane sec. On y ajoute ensuite progressivement et à température ambiante 20 mmol de butyl lithium. On agite la solution obtenue pendant trois heures et à température ambiante, jusqu'à ce que cesse le dégagement gazeux. On obtient un précipité blanc, que l'on filtre et lave à deux reprises avec 40 ml d'heptane. Puis on le sèche sous vide, pour obtenir le sel précité.

20

\* (marque de commerce)

- Synthèse du complexe organométallique de formule  $[(C_5H_4)SiMe_3]_2NdCl$ :

On agite à reflux et pendant une nuit une solution de 4 mmol de  $NdCl_3$  anhydre dans du tétrahydrofuranne (THF). On ajoute ensuite à cette solution 8 mmol dudit sel de formule  $Li[(C_5H_4)SiMe_3]$ , puis on agite à reflux le mélange obtenu dans le THF et pendant 48 heures. On évapore ensuite le THF, puis on ajoute au mélange 60 ml de toluène. On filtre le sel présent en solution, on concentre la solution restante, puis on la cristallise à  $-30^\circ C$ . On obtient ainsi ledit complexe organométallique.

- L'analyse élémentaire centésimale de ce complexe donne les pourcentages suivants pour les atomes de carbone et d'hydrogène:

% C = 42,05 et % H = 5,9.

On a procédé à la caractérisation de ce complexe organométallique par la technique de RMN  $^1H$  à 300 MHz.

On observe par cette technique deux massifs dont chaque intégrale correspond à 4 protons: un premier massif à 26,55 ppm est représentatif des protons de  $C_5H_4$  qui sont liés au premier groupe cyclopentadiényle de ce complexe, et un second massif à 11,4 ppm est représentatif des protons de  $C_5H_4$  qui sont liés au second groupe cyclopentadiényle.

On observe enfin un massif à -12,38 ppm, dont l'intégrale correspond à 18 protons et qui est représentatif des protons des deux substituants  $Si(CH_3)_3$  dudit complexe.

- Procédé de copolymérisation de l'éthylène et du butadiène:

On réalise quatre essais correspondant chacun à l'introduction en une seule fois, dans un réacteur contenant environ 300 ml de toluène, dudit complexe organométallique de formule  $[(C_5H_4)SiMe_3]_2NdCl$  en quantité x (mg) déterminée, d'un mélange d'éthylène et de butadiène avec une fraction molaire déterminée y (%) de butadiène, et d'un co-catalyseur. La température interne du réacteur est portée à  $80^\circ C$ .

Lorsque la fraction y de butadiène le permet, on maintient la pression interne du réacteur à une valeur constante, qui est égale à 4 bars.

Après un temps t, on stoppe la polymérisation par refroidissement et dégazage du réacteur, puis on fait précipiter le polymère obtenu dans du méthanol. Après séchage, on obtient une masse m de polymère.

Pour chacun des trois premiers essais, le co-catalyseur utilisé est constitué d'un mélange de butyl lithium et d'hydruure de diisobutyl aluminium (appelés respectivement BuLi et HDiBA dans la suite de la présente description) selon les proportions molaires suivantes:

BuLi / HDiBA /néodyme = 10/10/1.

5 Pour le quatrième essai, le co-catalyseur utilisé est constitué de butyloctyl magnésium (appelé BOMAG ci-après), selon la proportion molaire de 20/1 par rapport au néodyme.

Le tableau I ci-après précise les conditions opératoires et les résultats obtenus pour les quatre essais précités.

10

Tableau I

essais	x (mg)	y (%) dans mélange monomères	% butadiène dans le copolymère	stéréochimie de l'insertion du butadiène dans le copolymère			co-catalyseur	t (min)	m (g)
				% 1, 2	% 1, 4 trans	% trans 1, 2 cyclohexane			
n°1	29	0	0	-	-	-	BuLi+HDiBA	30	20
n°2	32	3,9	3,5	4	96	0	BuLi+HDiBA	80	3,7
n°3	36	21,2	16,4	3	97	0	BuLi+HDiBA	260	2
n°4	16	4,5	9,5	8,6	85,2	6,2	BOMAG	132	1,2

On a cherché à déterminer la statistique d'enchaînements "éthylène-butadiène" pour le copolymère obtenu à l'essai n°3.

15 En mettant en oeuvre la méthode de l'annexe II, on a obtenu pour ce copolymère:

- un indice de bloc  $\eta$  égal à 1,12 et
- un indice de bloc  $\eta_{\text{alterné}}$  (correspondant à un copolymère parfaitement alterné de même composition) égal à 1,19.

20 On en déduit que ce copolymère présente une tendance à l'alternance pour ces enchaînements.

- Procédé de copolymérisation de l'éthylène et de l'isoprène:



On synthétise ledit complexe organométallique de formule  $[(C_5H_4)SiMe_3]_2NdCl$  de la même manière qu'au paragraphe 1) de cet exemple 1.

On réalise trois essais correspondant chacun à l'introduction dans un réacteur d'une solution contenant 300 ml de toluène, x (mg) dudit complexe de formule  $[(C_5H_4)SiMe_3]_2NdCl$ , du BuLi, du  
5 HDiBA et y (ml) d'isoprène.

Le BuLi et l'HDiBA sont introduits dans des proportions qui sont telles que:

BuLi / néodyme = 10 et HDiBA / néodyme = 10.

La température interne du réacteur est portée à 80° C et on additionne de l'éthylène à la solution précitée. La pression à l'intérieur du réacteur est maintenue constante et égale à 4 bars.

10 Après un temps t, on stoppe la polymérisation par un refroidissement et un dégazage du réacteur, puis on fait précipiter le copolymère obtenu dans du méthanol.

Le tableau II ci-dessous précise les conditions opératoires et les résultats obtenus pour les trois essais précités.

15

Tableau II

essais	x (mg)	y (ml)	% isoprène dans le copolymère	stéréochimie de l'insertion de l'isoprène dans le copolymère			co-catalyseur	t (min)	m (g)
				% 1, 2	% 1, 4	% 3, 4			
n°1	49,5	1	0,98	2,3	89,7	8,0	BuLi+HDiBA	60	3,37
n°2	48,2	3	0,96	2,3	89,6	8,1	BuLi+HDiBA	60	2,42
n°3	45,2	10	3,8	1,6	90,9	7,5	BuLi +HDiBA	60	1,29

**EXEMPLE 2:**

**Système catalytique comprenant un complexe organométallique neutre ponté:  
le chloro ( $\mu$ -diméthylsilyl)bis( $\eta^5$ -triméthylsilylcyclopentadiényl) néodyme,  
répondant à la formule  $\{[(C_5H_3)SiMe_3]_2SiMe_2\}NdCl$  (formule générique « **B** » précitée).**

5      - Synthèse d'un composé de formule  $[(C_5H_4)SiMe_3]_2SiMe_2$ :

On introduit dans un tube de Schlenk 16 mmol d'un composé de formule  $Li[(C_5H_4)SiMe_3]$ , 8 mmol de  $Me_2SiCl_2$  et 80 ml de THF. On agite l'ensemble pendant une nuit et à température ambiante. On évapore ensuite une partie du THF, et on ajoute de l'heptane. La solution obtenue est  
10 ensuite successivement hydrolysée, lavée au moyen d'une solution aqueuse saturée en  $NH_4Cl$ , et séchée sur du sulfate de magnésium. On évapore ensuite le THF, et le produit finalement obtenu est une huile visqueuse répondant à la formule précitée.

15      - Synthèse d'un sel de formule  $[(C_5H_3)SiMe_3]_2SiMe_2Li_2$ :

Dans un tube de Schlenk qui contient une solution de solution de THF comprenant 7 mmol dudit composé de formule  $[(C_5H_4)SiMe_3]_2SiMe_2$ , on ajoute progressivement et à 0° C 14 mmol de BuLi. On agite l'ensemble à température ambiante pendant 6 heures, puis on fait précipiter le produit obtenu par ajout d'heptane. On filtre ensuite le précipité, on le lave à l'heptane puis on le sèche sous vide. On obtient ainsi le sel précité.

20      - Synthèse du complexe organométallique de formule  $\{[(C_5H_3)SiMe_3]_2SiMe_2\}NdCl$ :

On agite à reflux et pendant une nuit 4 mmol de  $NdCl_3$  anhydre dans du THF. On ajoute ensuite 4 mmol dudit sel de formule  $[(C_5H_3)SiMe_3]_2SiMe_2Li_2$  à cette suspension. Puis on agite l'ensemble, dans une premier temps, pendant 4 heures à température ambiante puis, dans un second  
25 temps, pendant 24 heures à reflux dans le THF. On évapore le THF et on ajoute du toluène. On filtre le sel, puis on cristallise à une température de -10° C le produit finalement obtenu après l'avoir concentré. On obtient ainsi ledit complexe organométallique.

30      - L'analyse élémentaire centésimale de ce complexe donne les pourcentages suivants pour les atomes de carbone et d'hydrogène:

% C = 42,8 et % H = 5,75.

On a procédé à la caractérisation de ce complexe organométallique par la technique de RMN  $^1\text{H}$  à 300 MHz. On observe par cette technique deux massifs dont chaque intégrale correspond à 3 protons:

un premier massif à 2,13 ppm et un second massif à - 8,97 ppm sont chacun représentatifs des protons de  $\text{Si}(\text{CH}_3)_2$  de ce complexe.

On observe enfin un massif à -2,99 ppm, dont l'intégrale correspond à 18 protons et qui est représentatif des protons des deux substituants  $\text{Si}(\text{CH}_3)_3$  dudit complexe.

On notera que les pics correspondant aux protons de  $\text{C}_5\text{H}_3$  ne sont pas détectés, probablement du fait que ces pics sont très larges.

#### - Procédé de copolymérisation:

On réalise trois essais en procédant comme dans l'exemple 1, à la différence que l'on utilise à titre de complexe organométallique ce composé de formule  $\{[(\text{C}_5\text{H}_3)\text{SiMe}_3]_2\text{SiMe}_2\}\text{NdCl}$ .

Pour chacun de ces trois essais, le co-catalyseur utilisé est constitué d'un mélange de BuLi et d'HDiBA selon les proportions molaires suivantes:

$\text{BuLi} / \text{HDiBA} / \text{néodyme} = 10/10/1$ .

Le tableau III ci-dessous précise les conditions opératoires et les résultats obtenus pour les trois essais précités.

Tableau III

essais	x (mg)	y (%) dans mélange monomères	% butadiène dans le copolymère	stéréochimie de l'insertion du butadiène dans le copolymère			co-catalyseur	t (min)	m (g)
				% 1, 2	% 1, 4 trans	% trans 1, 2 cyclohexane			
n°1	31	5,4	6,9	2	98	0	BuLi+HDiBA	30	13,5
n°2	30	43	41	2,5	97,5	0	BuLi+HDiBA	120	4,8
n°3	36	80	61,5	4,5	95,5	0	BuLi+HDiBA	900	0,5

On a cherché à déterminer la statistique d'enchaînements "éthylène-butadiène" pour le copolymère obtenu à l'essai n°2.



En mettant en oeuvre la méthode de l'annexe II, on a obtenu pour ce copolymère:

- un indice de bloc  $\eta$  égal à 1,69 et
- un indice de bloc  $\eta_{\text{alterné}}$  (correspondant à un copolymère parfaitement alterné de même composition) égal à 1,78.

On en déduit que ce copolymère présente une tendance à l'alternance pour ces enchaînements.

### **EXEMPLE 3:**

**Système catalytique comprenant un complexe organométallique neutre et non ponté:  
le chloro bis( $\eta^5$ -fluorényl) néodyme,  
répondant à la formule  $(C_{13}H_9)_2NdCl$  (formule générique « A »).**

#### **- Synthèse d'un sel de formule $C_{13}H_9Li$ :**

On fait réagir, à température ambiante et dans de l'heptane, 39 mmol d'un composé de formule  $C_{13}H_{10}$  avec 39 mmol de BuLi, pendant une nuit puis pendant 3 heures à reflux. On lave à l'heptane le sel obtenu, puis on le sèche sous vide. On obtient ainsi le sel précité.

#### **- Synthèse du complexe organométallique de formule $(C_{13}H_9)_2NdCl$ :**

On agite pendant une nuit et à reflux 1,6 mmol de  $NdCl_3$  dans du THF. On refroidit la suspension obtenue jusqu'à température ambiante, puis on y ajoute 3,25 mmol dudit sel de formule  $C_{13}H_9Li$ . On agite l'ensemble pendant une nuit et à température ambiante, puis à reflux du THF pendant 4 heures. Après avoir évaporé le THF, on extrait au toluène le produit obtenu puis on le récupère par évaporation sous vide du toluène. On obtient ainsi ledit complexe organométallique.

#### **- Procédé de copolymérisation:**

On réalise quatre essais en procédant comme dans l'exemple 1, à la seule différence que l'on utilise à titre de complexe organométallique ce composé de formule  $(C_{13}H_9)_2NdCl$ .

Pour les trois premiers essais, le co-catalyseur utilisé est constitué d'un mélange de BuLi et d'HDiBA selon les proportions molaires suivantes:

BuLi / HDiBA / néodyme = 10/10/1.

Pour le quatrième essai, le co-catalyseur utilisé est constitué de butyloctyl magnésium, selon la proportion molaire de 20/1 par rapport au néodyme.

Le tableau IV ci-dessous précise les conditions opératoires et les résultats obtenus pour les quatre essais précités.

5

Tableau IV

essais	x (mg)	y (%) dans mélange monomères	% butadiène dans le copolymère	stéréochimie de l'insertion du butadiène dans le copolymère				co-catalyseur	t (min)	m (g)
				% 1,2	% 1,4 trans	% 1,4 cis	% trans 1, 2 cyclohexane			
n°1	24,9	4	3,6	8	82	0	10	BuLi+HDiBA	65	2,7
n°2	24,5	20	9,2	9	79-83	0	12-7	BuLi+HDiBA	120	1,7
n°3	26	30	42	13	75	9	3	BuLi+HDiBA	1560	0,8
n°4	24,4	4,5	4	6	87,5	0	6,5	BOMAG	100	1,2

10 On a cherché à déterminer la statistique d'enchaînements "éthylène-butadiène" pour le copolymère obtenu à l'essai n°3.

En mettant en oeuvre la méthode de l'annexe II, on a obtenu pour ce copolymère:

- un indice de bloc  $\eta$  égal à 0,4 et
- un indice de bloc  $\eta_{\text{alterné}}$  (correspondant à un copolymère parfaitement alterné de même composition) égal à 1,7.

15

On en déduit que ce copolymère présente une tendance à blocs pour ces enchaînements.

**EXEMPLE 4:**

**Système catalytique comprenant un complexe organométallique neutre ponté:  
le chloro ( $\mu$ -diméthylsilyl)bis( $\eta$ 5-fluorényl) néodyme,  
répondant à la formule  $[(C_{13}H_8)_2SiMe_2]NdCl$  (formule générique « B » précitée).**

5

**- Synthèse d'un composé de formule  $Me_2Si(C_{13}H_9)_2$ :**

On agite à reflux dans du THF et pendant une nuit 18 mmol de  $C_{13}H_{10}$  et 18 mmol d'hydru-  
de sodium. On ajoute ensuite à ce mélange 8,1 mmol de  $Cl_2SiMe_2$ , puis on agite la solution obtenue  
10 pendant 3 heures et à température ambiante. On évapore ensuite une partie du THF, puis on ajoute  
de l'heptane. On hydrolyse la phase organique obtenue et on l'extrait à plusieurs reprises par une  
solution aqueuse saturée en  $NH_4Cl$ . Puis on évapore le solvant et, après séchage sous vide à  $60^\circ C$   
de l'extrait, on récupère finalement ledit composé répondant à la formule précitée.

15

**- Synthèse d'un sel de formule  $Me_2Si(C_{13}H_8)_2Li_2$ :**

On agite à température ambiante, pendant une nuit dans du toluène puis pendant 3 heures à  
 $50^\circ C$ , 4,4 mmol dudit composé de formule  $Me_2Si(C_{13}H_9)_2$  et 13 mmol de BuLi. On obtient un  
précipité constitué d'un sel répondant à la formule précitée, que l'on lave à l'heptane puis que l'on  
sèche sous vide.

20

**- Synthèse du complexe organométallique de formule  $[(C_{13}H_8)_2SiMe_2]NdCl$ :**

On agite à reflux du THF et pendant une nuit 2 mmol de  $NdCl_3$ . On y ajoute ensuite 2,1 mol  
dudit sel à  $0^\circ C$ , puis on chauffe l'ensemble à reflux pendant 22 heures. On évapore ensuite le THF,  
et on récupère ledit complexe organométallique par extraction au toluène suivie d'une évaporation  
25 de ce dernier.



- Procédé de copolymérisation de l'éthylène et du butadiène:

On réalise cinq essais en procédant comme dans l'exemple 1, à la différence que l'on utilise à titre de complexe organométallique ce composé de formule  $[(C_{13}H_8)_2SiMe_2]NdCl$ .

Pour les deux premiers essais, le co-catalyseur utilisé est constitué d'un mélange de BuLi et d'HDiBA selon les proportions molaires suivantes:

BuLi / HDiBA / néodyme = 10/10/1.

Pour chacun des troisième et quatrième essais, le co-catalyseur utilisé est constitué de chlorure de butyl magnésium selon la proportion molaire de 20/1 par rapport au néodyme.

Pour le cinquième essai, le co-catalyseur utilisé est constitué de BuLi selon la proportion molaire de 2/1 par rapport au néodyme.

Le tableau V ci-dessous précise les conditions opératoires et les résultats obtenus pour les cinq essais précités.

Tableau V

essais	x (mg)	y (%) dans mélange monomères	% butadiène dans le copolymère	stéréochimie de l'insertion du butadiène dans le copolymère			co-catalyseur	t (min)	m (g)
				% 1,2	% 1,4 trans	% trans 1, 2 cyclohexane			
n°1	21,3	5	4	18	23	58	BuLi+HDiBA	70	9,9
n°2	25,8	20	10,2	23,5	28,5	48	BuLi+HDiBA	135	3
n°3	18,9	5	3,9	20	18	62	butyl MgCl	65	12,1
n°4	17,3	19	21	28	22	50	butyl MgCl	60	2,8
n°5	19,2	4,5	5,4	23	23	54	BuLi	60	3,7

- Procédé de copolymérisation de l'éthylène et de l'isoprène:

On synthétise ledit complexe organométallique de formule  $[(C_{13}H_8)_2SiMe_2]NdCl$  de la même manière qu'au paragraphe 1) de cet exemple 4.

On réalise un essai en suivant le même procédé que celui décrit au paragraphe 2) de l'exemple 1.

Le tableau VI suivant précise les conditions opératoires et les résultats obtenus pour cet essai.

Tableau VI

x (mg)	y (ml)	% isoprène dans le copolymère	stéréochimie de l'insertion de l'isoprène dans le copolymère			co-catalyseur	t (min)	m (g)
			% 1, 2	% 1, 4	% 3, 4			
31,1	1	2,12	1,6	21,5	76,9	BuLi+HDiBA	6	4,30

5

**EXEMPLE 5:**

**Système catalytique comprenant un complexe organométallique connu,  
répondant à la formule  $(C_5Me_5)_2NdCl_2Li(OEt_2)_2$ .**

10

- Synthèse d'un sel de formule  $Li(C_5Me_5)$ :

A 29,9 mmol de  $HC_5Me_5$  dans de l'heptane à 0° C, on ajoute 29,9 mmol de BuLi. On agite l'ensemble à température ambiante pendant une nuit. On lave ensuite le sel  $Li(C_5Me_5)$  ainsi obtenu, puis on le sèche sous vide.

15

- Synthèse d'un complexe organométallique de formule  $(C_5Me_5)_2NdCl_2Li(OEt_2)_2$ :

On agite à reflux dans du tétrahydrofuranne (THF) et pendant une nuit 9,2 mmol de trichlorure de néodyme  $NdCl_3$ . On porte ensuite à 0° C la suspension ainsi obtenue, puis on y ajoute 18,4 mmol dudit sel de formule  $Li(C_5Me_5)$ . On agite l'ensemble à reflux pendant une nuit. On évapore ensuite le THF puis on ajoute de l'éther à la solution obtenue. On filtre ensuite la solution résultante, puis on la concentre. On obtient finalement le complexe organométallique répondant à la formule précitée par cristallisation à -30° C.

20

- Procédé de copolymérisation de l'éthylène et du butadiène:

On réalise deux essais en procédant comme dans l'exemple 1, à la différence que l'on utilise à titre de complexe organométallique ce composé de formule  $(C_5Me_5)_2NdCl_2Li(OEt)_2$ .

Le tableau VII ci-dessous précise les conditions opératoires et les résultats obtenus avec, à titre de co-catalyseur, le mélange précité de BuLi et d'HDiBA selon les proportions butyl lithium / HDiBA / néodyme égales à 10/10/1.

Tableau VII

essais	x (mg)	y dans mélange monomère	% butadiène dans le copolymère	stéréochimie de l'insertion du butadiène dans le copolymère			co-catalyseur	t (min)	m (g)
				% 1, 2	% 1, 4 trans	% trans 1, 2 cyclohexane			
n°1	18,7	5	0,6	30	70	0	BuLi+HDiBA	65	1,6
n°2	14,4	5	0,6	76	24	0	BuLi+HDiBA	60	1,4



ANNEXE I

**Méthode de détermination de la microstructure des insertions des diènes conjugués**  
**dans les copolymères d'éthylène et d'un diène conjugué:**

## NOTATIONS:

Dans l'ensemble des schémas et des tableaux de cette annexe, on a utilisé les symboles  
suivants:

- T: unité butadiène ou isoprène insérée en 1, 4 trans,
- C: unité butadiène ou isoprène insérée en 1, 4 cis,
- L: unité butadiène insérée en 1, 4 cis ou trans,
- V: unité butadiène insérée en 1, 2,
- Cy: unité butadiène insérée dans un cycle,
- E: unité éthylène, et
- B: unité butadiène.

1) Concernant les copolymères d'éthylène et de butadiène:a) A partir du spectre RMN <sup>13</sup>C:

Pour déterminer les proportions des divers taux de butadiène d'un copolymère, il est nécessaire de réaliser un spectre RMN<sup>13</sup>C.

Dans certains cas, ce spectre comporte des raies caractéristiques de la formation de cycles, qui sont répertoriées dans le tableau 4 ci-après. Il n'est alors pas possible de calculer simplement le taux de butadiène à partir du spectre RMN<sup>1</sup>H. En effet, les résonances qui résultent de ces cycles en RMN<sup>1</sup>H se trouvent dans la zone des CH<sub>2</sub> de l'éthylène, et elles ne peuvent pas être évaluées séparément.

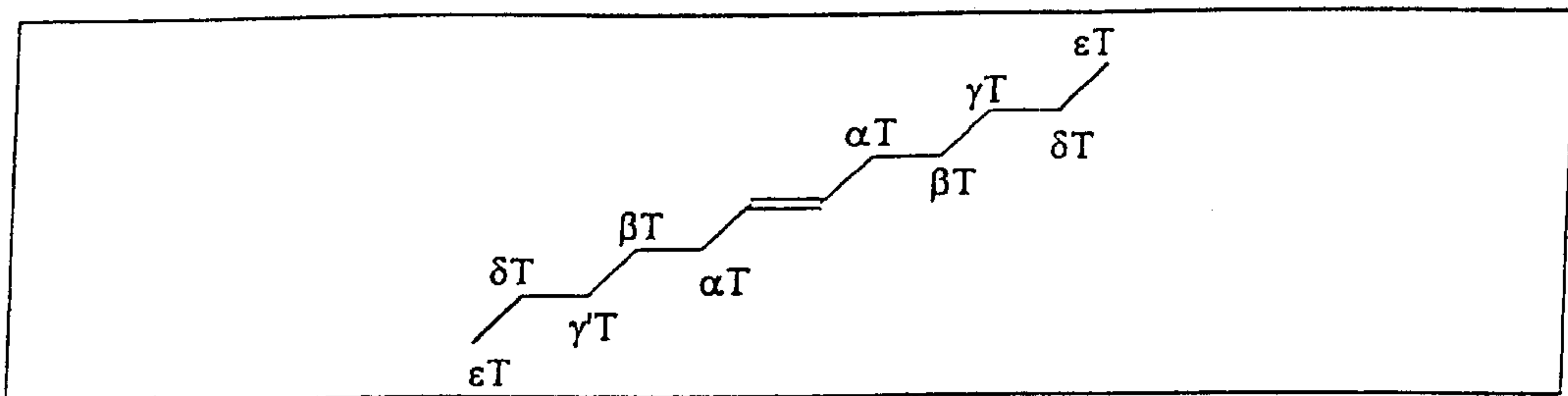
Dans ce cas précis, le calcul des taux de butadiène s'effectue à partir de la détermination des intégrales des raies du spectre RMN<sup>13</sup>C.

Pour les copolymères d'éthylène et de butadiène, le butadiène peut s'insérer dans la chaîne de copolymère suivant quatre types d'insertion:

- 1, 4 trans (voir schéma 1 ci-après),
- 1, 4 cis (voir schéma 2 ci-après),
- 1, 2 (voir schéma 3 ci-après), et
- sous forme de cycles trans 1, 2 cyclohexane (voir schéma 4 ci-après).

10

Schéma 1 : notations employées pour désigner les différents carbones d'une unité butadiène insérée en 1,4 trans et sous forme isolée dans la chaîne de copolymère



20

Schéma 2 : notations employées pour désigner les différents carbones d'une unité butadiène insérée en 1,4 cis et sous forme isolée dans la chaîne de copolymère

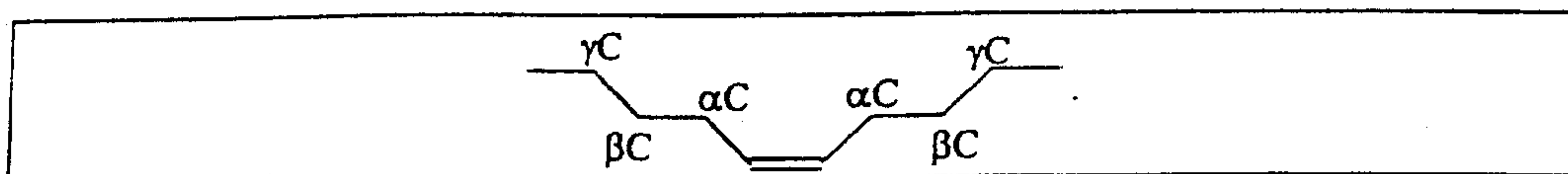
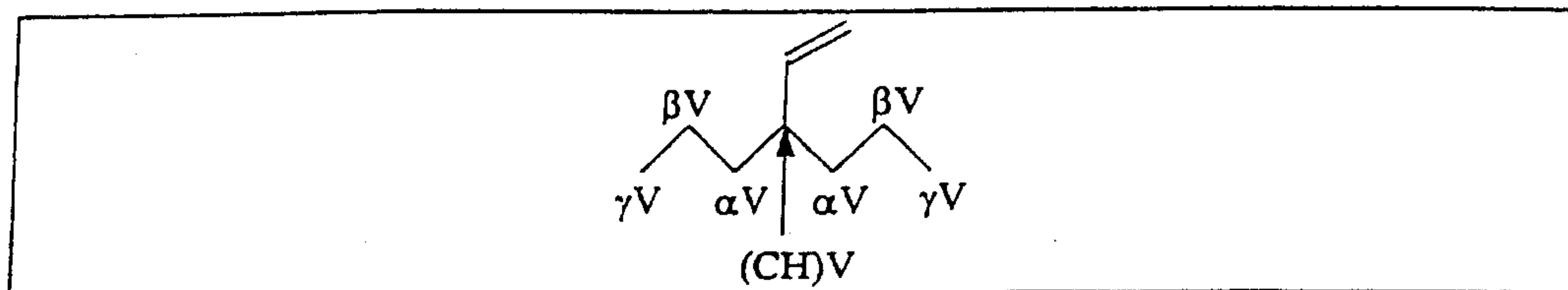
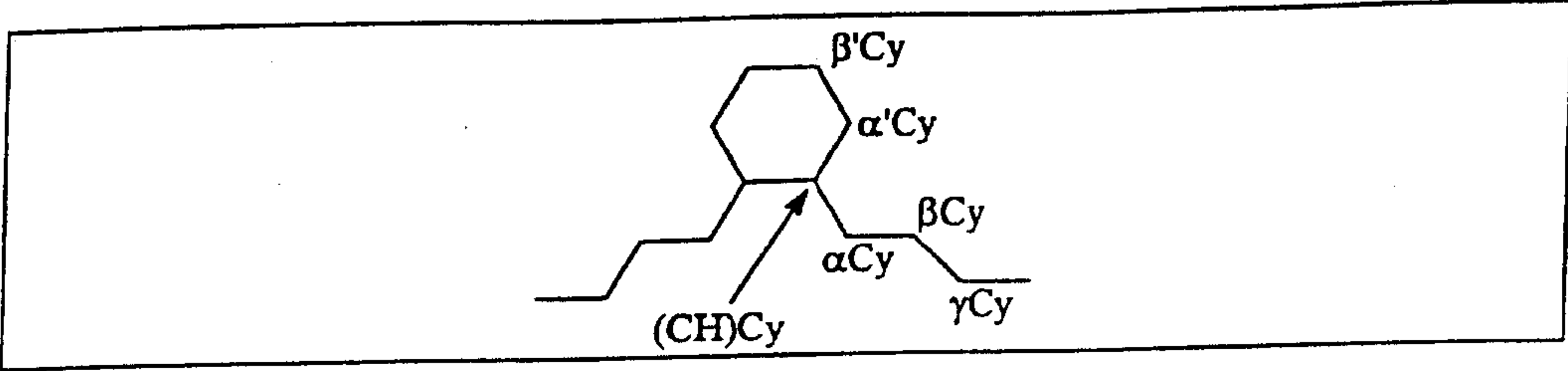


Schéma 3 : notations employées pour désigner les différents carbones d'une unité butadiène insérée en 1,2 et sous forme isolée dans la chaîne de copolymère



30

Schéma 4 : notations employées pour désigner les différents carbones d'une unité butadiène insérée sous forme de trans 1,2 cyclohexane isolés dans la chaîne de copolymère



La plupart de ces atomes de carbone résonnent à une fréquence qui leur est propre, laquelle ne correspond pas à la fréquence de résonance des atomes de carbone d'une chaîne de polyéthylène. Les tableaux suivants 1 à 4 résument les valeurs des déplacements chimiques  $\delta$  pour ces atomes de carbone, et pour chacun des quatre types d'insertion précités.

Tableau 1 : insertion du butadiène en 1,4 cis, déplacement chimique caractéristique

Intégrale	Type de carbone	$\delta$ (ppm)
13	$\alpha C$	27,88

Tableau 2 : raies caractéristiques de l'insertion du butadiène en 1,2

Intégrale	Type de carbone	$\delta$ (ppm)
	(CH) V	44,27
9	$\alpha V$	35,48
10	$\beta V$	27,51
	$\gamma V$	30,22



Tableau 3 : raies caractéristiques de l'insertion du butadiène sous forme de trans(1,2)cyclohexane

Intégrale	Type de carbone	$\delta$ (ppm)
	(CH)Cy	42,02
	$\alpha$ Cy	33,99
	$\alpha'$ Cy	32,26
	$\gamma$ Cy	30,59
11	$\beta$ Cy	27,02
12	$\beta'$ Cy	26,67

10

Tableau 4 : valeurs des déplacements chimiques des carbones d'unités butadiène insérées en (1,4) trans

Intégrale	Type de carbone	$\delta$ (ppm)
1	$\gamma\delta$ TEET	29,42 ppm
2	$\gamma$ TEEE $\beta\gamma$ TET	29,56 ppm
3	$\delta\epsilon$ TEEET	29,87 ppm
4	$\delta$ TEEEEE	29,91 ppm
4'	$\epsilon$ TEEEEE $\beta\epsilon$ TEET	30,02 ppm
5	EE et $\beta$ TEEE	30,06 ppm
6	$\alpha\delta$ TET	32,76 ppm
7	$\alpha$ TEE	32,90 ppm
8	$\alpha\beta$ TT	33,06 ppm

20

Pour ces copolymères d'éthylène et de butadiène obtenus selon la présente invention, divers types d'enchaînements ont été mis en évidence grâce aux spectres RMN<sup>13</sup>C. Ces enchaînements sont illustrés sur les schémas 5 à 8 ci-après. On a utilisé deux lettres de l'alphabet grec pour nommer en regard les différents carbones de ces enchaînements.

30

Schéma 5 : notations employées pour décrire les carbones d'un enchaînement TET

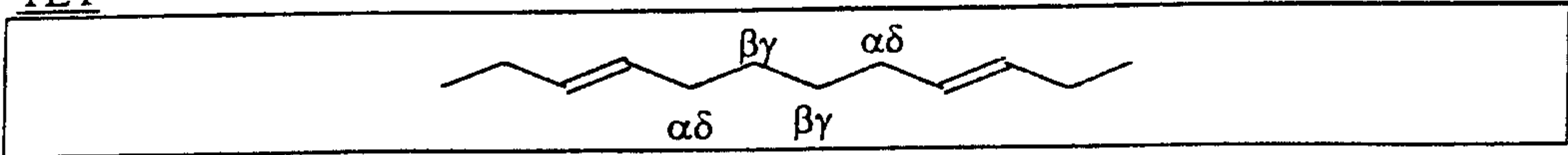


Schéma 6 : notations employées pour décrire les carbones d'un enchaînement TT



Schéma 7 : notations employées pour décrire les carbones d'un enchainement TEET

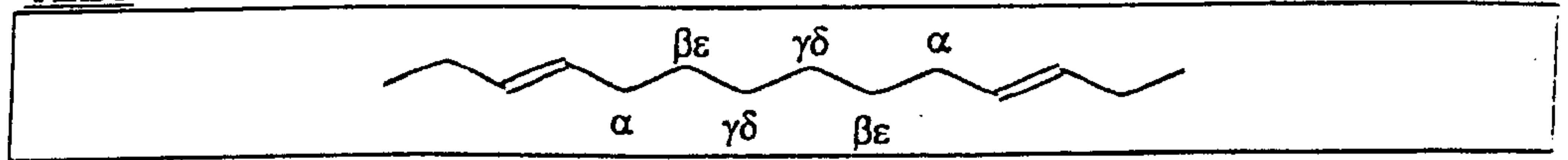
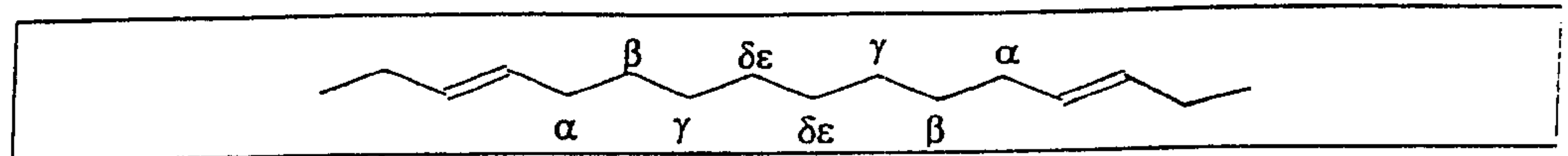


Schéma 8 : notations employées pour décrire les carbones d'un enchainement TEEET



10

Comme pour les unités de butadiène insérées de façon isolée dans la chaîne de copolymère, certains des carbones de ces enchaînements résonnent à une fréquence qui leur est propre. Les valeurs correspondantes des déplacements chimiques sont également répertoriées dans le tableau 4 ci-dessus (les lettres majuscules dans la colonne relative à chaque type de carbone précisent le type d'enchaînement dont il est question).

La composition du copolymère a été déterminée à partir des valeurs des intégrales de certaines des raies qui sont listées dans les tableaux 1 à 4 ci-dessus. On peut écrire que:

20

$$T = (6+7+8)/2$$

$$V = (9+10)/4$$

$$Cy = (11+12)/4$$

$$C = 13/2$$

$$2E = (\text{intégrale de 26,8 ppm à 31,5 ppm}) + (12+9)/2.$$

Ces valeurs sont ensuite transformées en pourcentages.

On peut alors écrire que

$$T \text{ ou } C = I_3 \div 2$$

$$V = I_4$$

$$E = [I_1 - 2 \times I_3 - 3 \times I_4 + 4 \times I_5] \div 4$$

Ces valeurs sont aisément transformées en pourcentages.

10

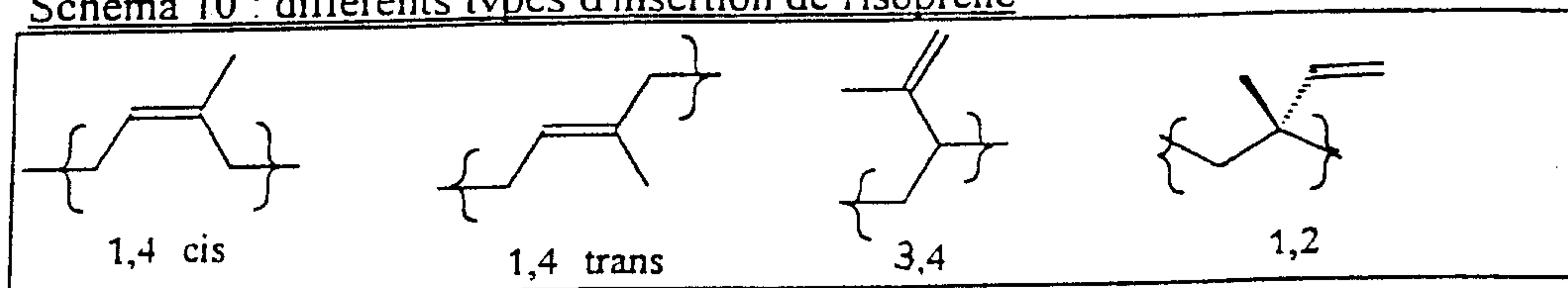
## 2) Concernant les copolymères d'éthylène et d'isoprène:

Pour déterminer les proportions des insertions d'isoprène dans ces copolymères, on réalise la fois des spectres RMN<sup>13</sup>C et RMN<sup>1</sup>H desdits copolymères.

L'isoprène peut s'insérer dans la chaîne de copolymère suivant quatre types d'insertion illustrés sur le schéma 10 suivant.

Schéma 10 : différents types d'insertion de l'isoprène

20

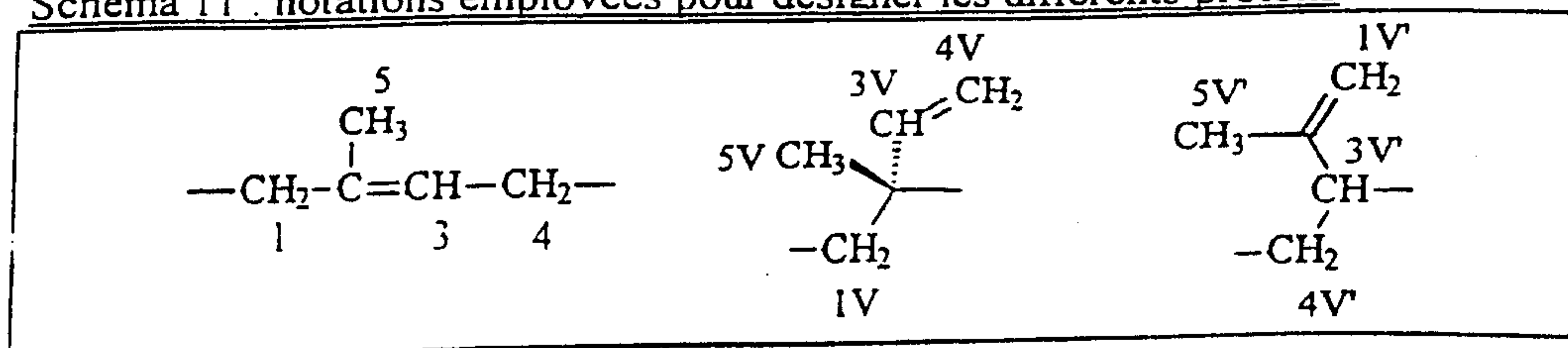


L'observation du spectre RMN <sup>13</sup>C montre que, dans ce cas, à l'inverse des copolymères d'éthylène et du butadiène, il ne se forme pas de cycles.

Les taux d'insertion en 1,2, 3,4 et 1,4 sont déterminés à partir du spectre RMN <sup>1</sup>H. Des raies caractéristiques de ces insertions sont présentes sur le spectre <sup>1</sup>H. Elles sont résumées dans le tableau 6. Les notations qui sont employées sont décrites sur le schéma 11.

30

Schéma 11 : notations employées pour désigner les différents protons



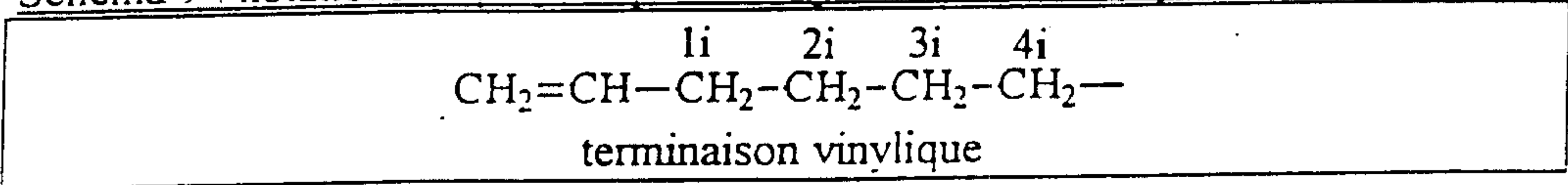


b) A partir du spectre RMN <sup>1</sup>H:

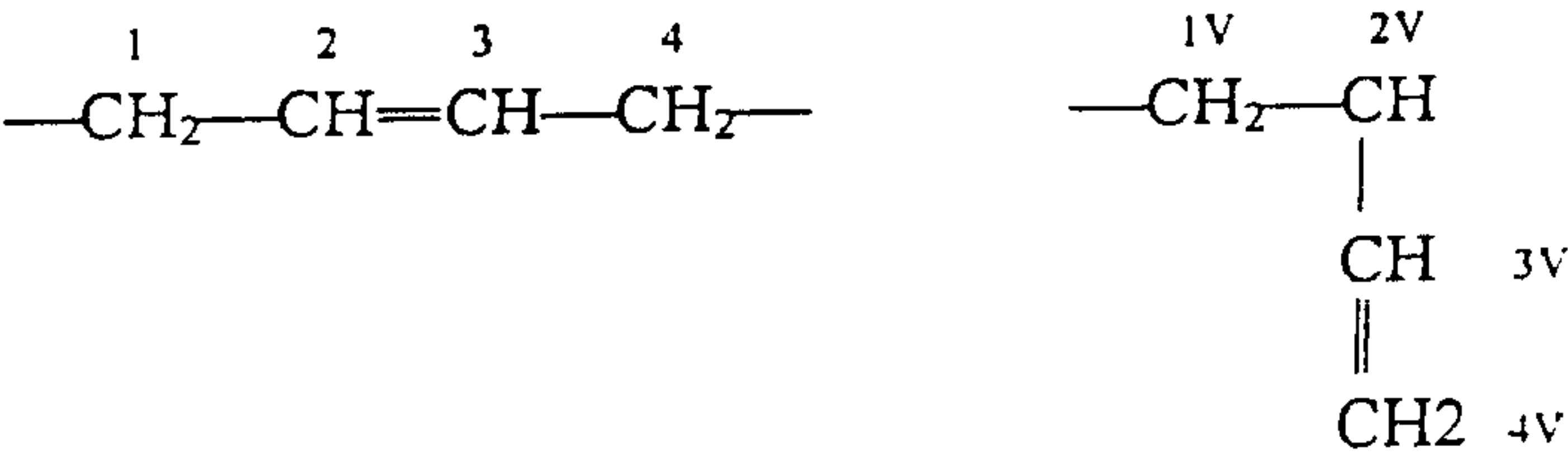
10

Lorsque sur le spectre RMN <sup>13</sup>C les raies caractéristiques de cycles sont absentes, le taux de butadiène inséré dans le copolymère peut être calculé plus précisément et plus simplement à partir du spectre RMN <sup>1</sup>H. Cependant ce calcul ne permet pas de déterminer si le butadiène s'est inséré en cis ou en trans. Il donne uniquement accès au pourcentage de butadiène total inséré en 1,4. Si, d'après le spectre RMN <sup>13</sup>C, les deux types d'insertions se produisent, il faut procéder au calcul du paragraphe précédent pour déterminer dans quelles proportions ces insertions ont lieu. Dans le cas contraire, le calcul s'effectue à partir des intégrales de certaines raies du spectre qui sont listées dans le tableau 5. Le schéma 8 précise la signification du terme terminaison vinylique.

Schéma 9 : notations employées pour désigner les différents protons



20



30

Tableau 5 : raies caractéristiques en RMN <sup>1</sup>H de copolymères éthylène/butadiène ainsi que de terminaisons de chaînes

Intégrale	δ (ppm)	Type de proton	Nombre de protons
I <sub>1</sub>	0,87 ; 0,89	CH <sub>3</sub> en fin de chaîne	
	1,30	1V	2
		CH <sub>2</sub> de l'éthylène	4
	2	1+4	4
		2V	1
I <sub>2</sub>	4,9	CH <sub>2</sub> en α d'une terminaison vinylique	2
		CH <sub>2</sub> = d'une terminaison vinylique	2
		4V	2
I <sub>3</sub>	5,40	2+3	2
L <sub>4</sub>	≅ 5,55	3V	1
I <sub>5</sub>	≅ 5,75	CH d'une terminaison vinylique	1

Tableau 6 : raies caractéristiques en RMN <sup>1</sup>H de copolymères d'éthylène et d'isoprène

Intégrale	δ en ppm	Type de proton	nombre de protons
S5	5,6 à 5,8	3V	1
S3	5,05 à 5,25	3	1
S2	4,82 à 5,05	4V	2
S <sub>1</sub>	4,42 à 4,82	1V'	2
	1,99	1+4	4
		3V'	1
	1,59	5V' et	3
		5 1,4 trans	3

1,4 = S<sub>3</sub>

3,4 = S<sub>1</sub>/2

1,2 = S<sub>2</sub>/2

E = [intégrale de 0,5 ppm à 2,5 ppm] - [7\*S<sub>3</sub> + 3\*S<sub>1</sub> + 5\*S<sub>5</sub>]

Ces valeurs sont aisément transformées en pourcentages.

Le spectre RMN <sup>13</sup>C permet de préciser si l'insertion de l'isoprène est en 1,4 cis ou en 1,4 trans car des raies caractéristiques de ces insertions sont présentes sur ce spectre (tableau 7).

Notation : insertion en 1,4 cis (C) ou 1,4 (T)

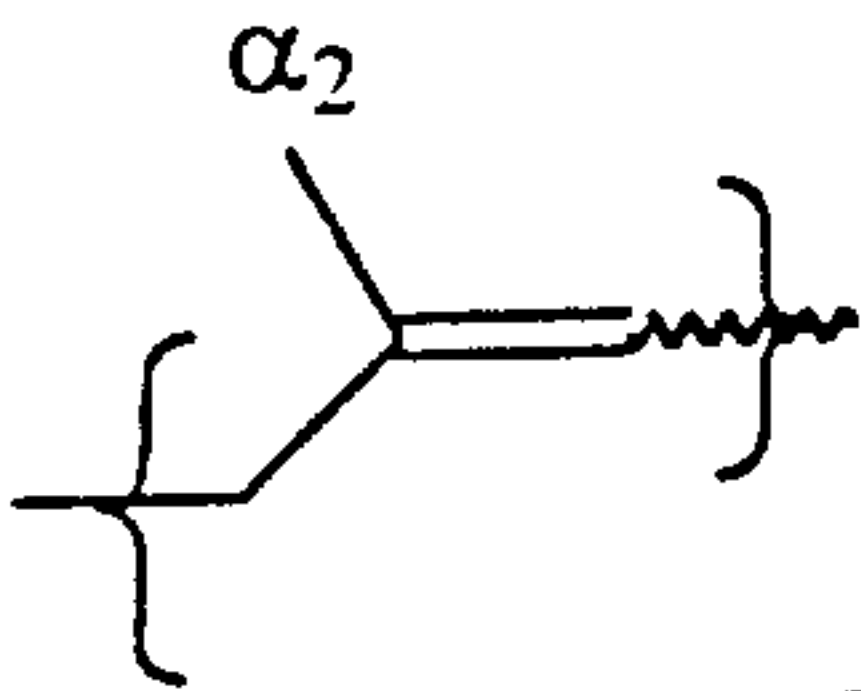


Tableau 7 : raies caractéristiques de l'insertion de l'isoprène en 1,4

Intégrale	Type de carbone	δ (ppm)
1	$\alpha_2$ (cis)	23,48
2	$\alpha_2$ (trans)	16,05

% 1,4 en cis = 1/(1+2)

% 1,4 en trans = 2/(1+2)

ANNEXE II

**Méthode de détermination de la statistique des enchaînements "éthylène-butadiène"**  
**dans les copolymères d'éthylène et de butadiène obtenus:**

## NOTATIONS

- 10 tt désigne la fraction de diades TT d'un copolymère,  
 ee désigne la fraction de diades EE d'un copolymère,  
 be désigne la fraction de diades BE ou EB d'un copolymère,  
 e désigne la fraction d'éthylène d'un copolymère, et  
 b désigne la fraction de butadiène d'un copolymère.

D'après ces définitions, on peut écrire que

- ee =  $EE / (EE + BE + TT)$   
 be =  $BE / (EE + TE + TT)$   
 e =  $E / (E + B)$   
 20 b =  $B / (E + B)$ ,  
 avec

- TT: nombre de diades TT d'un copolymère calculé à partir du spectre RMN<sup>13</sup>C,  
 EE: nombre de diades EE d'un copolymère calculé à partir du spectre RMN<sup>13</sup>C,  
 BE: nombre de diades BE ou EB d'un copolymère calculé à partir du spectre RMN<sup>13</sup>C,  
 E: nombre d'unités éthylène d'un copolymère calculé à partir du spectre RMN<sup>13</sup>C, et  
 T: nombre d'unités butadiène 1, 4 trans d'un copolymère calculé à partir du spectre  
 RMN<sup>13</sup>C.



Détermination de l'indice de bloc  $\eta$  pour estimer la structure statistique des copolymères:

Pour certains copolymères, une raie caractéristique de la présence de diades TT apparaît sur le spectre RMN<sup>13</sup>C. Sa valeur est donnée dans le tableau 4 de l'annexe I.

Pour les copolymères où  $\eta$  n'a pas été calculé, les unités butadiène sont isolées dans la chaîne.

L'indice de bloc est défini par la relation:

$$\eta = (be) / (be)_{\text{statistique}}$$

10

où  $(be)$  représente la fraction de diades BE ou EB du copolymère analysé, et

$(be)_{\text{statistique}}$  représente la fraction de diades BE ou EB d'un copolymère statistique de même composition.

Pour un copolymère statistique homogène, on a  $(be)_{\text{statistique}} = 2 \cdot e \cdot b$ ,

et l'indice de bloc  $\eta$  peut alors s'écrire:

$$\eta = (be) / (2 \cdot e \cdot b)$$

20

Pour un copolymère donné, l'indice de bloc  $\eta$  n'apportera des informations sur la structure de ce copolymère que s'il est comparé à un indice de bloc  $\eta_{\text{alterné}}$  du copolymère parfaitement alterné de même composition. Par définition, lorsque  $b < e$  (ce qui est le cas pour tous les copolymères de l'invention), on a:

$$\eta_{\text{alterné}} = 1/e$$

Pour déterminer  $\eta$  et  $\eta_{\text{alterné}}$ , il est donc nécessaire de connaître  $b$ ,  $e$ ,  $ee$ ,  $tt$  et  $be$ , soit encore  $B$ ,  $E$ ,  $EE$ ,  $BB$  et  $BE$ . Les valeurs de ces derniers paramètres peuvent être calculées à partir de certaines des intégrales des raies du spectre RMN<sup>13</sup>C (voir annexe I), lesquelles intégrales apparaissent dans les équations suivantes:

30

On a:

$$BE = (1 + 2 + 6 + 7) / 2 + 13 + 9 + 11$$

$$2 BB = 8$$

$$2 B = 6 + 7 + 8 + (9 + 10) / 2 + (11 + 12) / 2 + 13$$

$$2 E = [\text{intégrale de 26,8 ppm à 31,5 ppm}] + (12 + 9) / 2 - 13$$

$$EE = E - (BE) / 2 .$$

Conclusion sur la statistique des enchaînements éthylène/ butadiène:

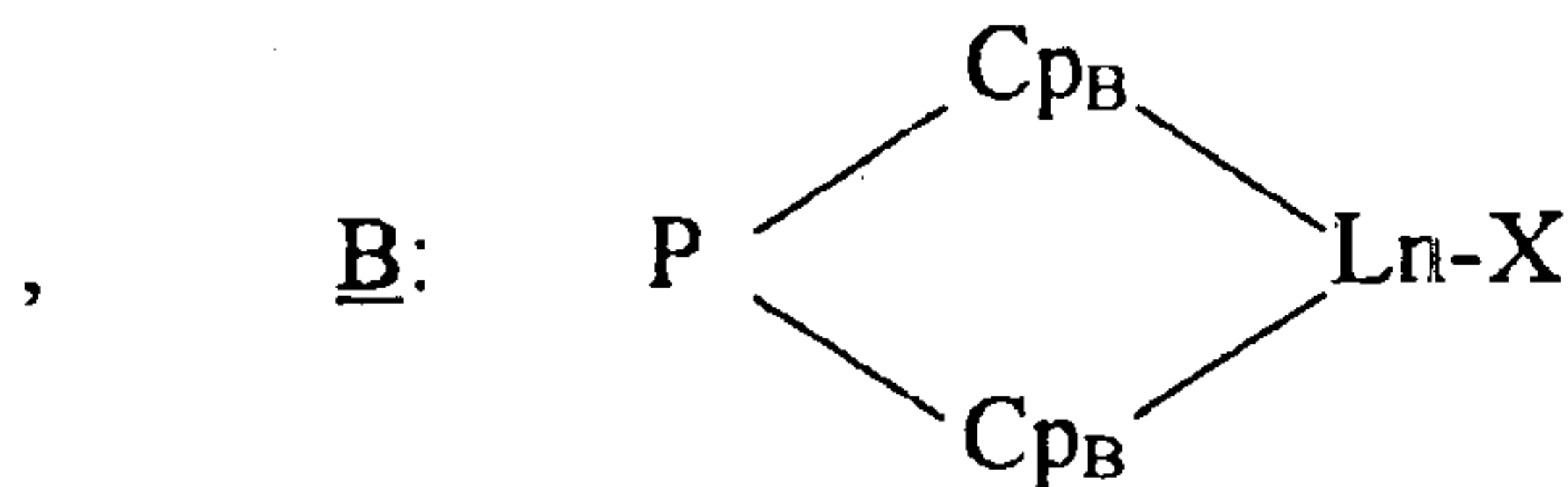
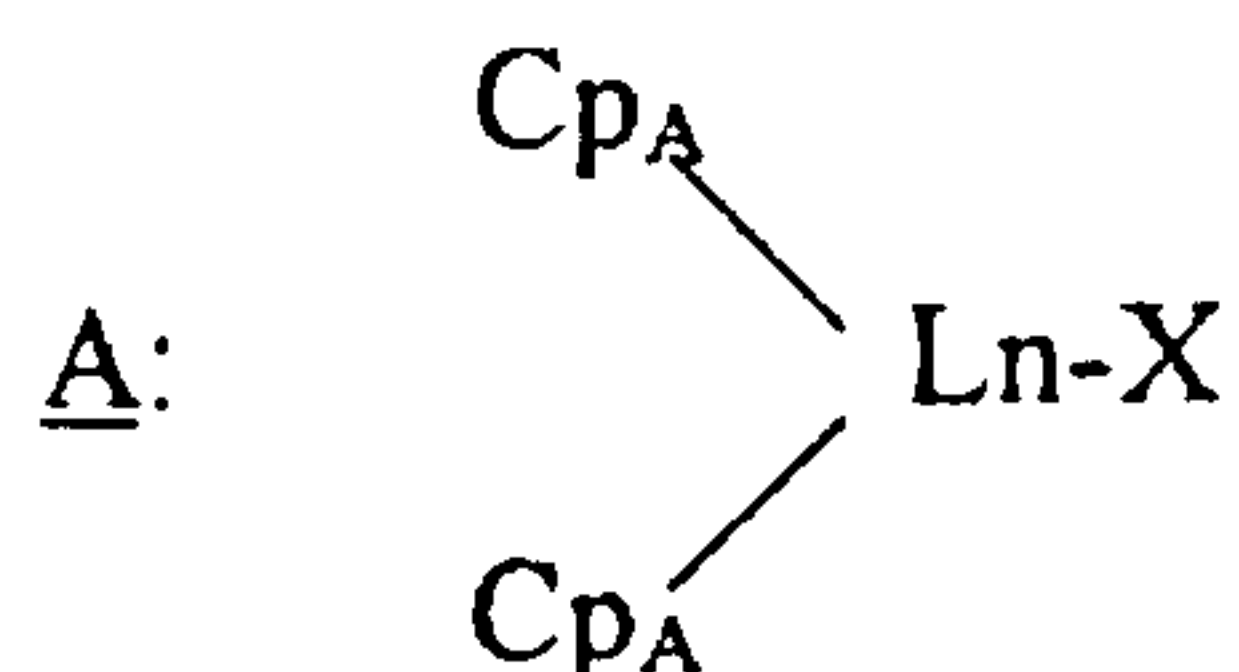
Plus  $\eta$  sera faible et plus le copolymère aura une tendance bloc.

Plus  $\eta$  sera proche de  $\eta_{\text{alterné}}$  et plus le copolymère aura une tendance à l'alternance.

**REVENDICATIONS:**

1. Système catalytique de polymérisation comprenant:

- d'une part, un complexe organométallique représenté par l'une des formules génériques suivantes A ou B:



où Ln représente un métal d'un lanthanide dont le numéro atomique varie de 57 à 71,

où X représente un halogène,

10 où, dans la formule A, sont reliées audit métal Ln deux molécules de ligands  $Cp_A$  constituées chacune d'un groupe cyclopentadiényle qui est substitué,

où, dans la formule B, est reliée audit métal Ln une molécule de ligand, constituée de deux groupes  $Cp_B$  cyclopentadiényle ou fluorényle qui sont substitués ou non et qui sont reliés entre eux par un pont P répondant à la formule  $MR_2$ , où M est un élément de la colonne IVA de la classification périodique de Mendeleev, et où R est un groupe alkyle comprenant de 1 à 20 atomes de carbone,

et

20 - d'autre part, un co-catalyseur qui est choisi parmi un alkyl magnésium, un alkyl lithium, un alkyl aluminium, et un réactif de Grignard, ou qui est constitué d'un mélange de ces constituants,

caractérisé en ce que, Me représentant un groupe méthyle:

dans ladite formule générique A,  $Cp_A$  est constitué d'un groupe cyclopentadiényle qui est substitué par un radical alkyl silyl répondant à la formule  $(C_5H_4)(SiMe_3)$  et en ce que,

dans ladite formule générique B,  $Cp_B$  est constitué d'un groupe cyclopentadiényle qui est substitué par un radical alkyl silyl répondant à la



formule  $(C_5H_3)(SiMe_3)$ , ou d'un groupe fluorényle non substitué répondant à la formule  $C_{13}H_8$ .

2. Système catalytique selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit complexe organométallique est représenté par ladite formule générique A.
3. Système catalytique selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit complexe organométallique est représenté par ladite formule générique B.
4. Système catalytique selon la revendication 3, caractérisé en ce que ledit métal M compris dans ledit pont P de formule  $MR_2$  est le silicium.
5. Système catalytique selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que ledit complexe organométallique est tel que le lanthanide Ln est le néodyme.
6. Système catalytique selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que ledit alkyl magnésium, ledit alkyl lithium, ledit alkyl aluminium et ledit réactif de Grignard dudit groupe parmi lequel est choisi ledit co-catalyseur, sont respectivement constitués de butyloctyl magnésium, de butyl lithium, d'hydruure de diisobutyl aluminium, et de chlorure de butyl magnésium.
7. Système catalytique selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que ledit co-catalyseur est constitué d'un mélange d'un alkyl aluminium et d'un alkyl lithium qui sont présents en quantités sensiblement stoechiométriques dans ledit mélange.
8. Procédé de préparation d'un système catalytique selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce qu'il consiste, dans un premier temps, à préparer ledit complexe organométallique
  - dans une première étape, en faisant réagir avec un alkyl lithium une molécule hydrogénée de ligand, représentée par la formule HCp, pour obtenir un sel de lithium,

- dans une seconde étape, en faisant réagir dans un solvant complexant ledit sel avec un trihalogénure anhydre dudit lanthanide qui est représenté par la formule  $\text{LnX}_3$ , où X représente un halogène,

- dans une troisième étape, en évaporant ledit solvant complexant, puis en procédant dans un solvant non complexant à l'extraction du produit obtenu au terme de ladite seconde étape, et éventuellement,

- dans une quatrième étape, en procédant à la cristallisation du produit extrait au terme de ladite troisième étape, pour obtenir ledit complexe organométallique qui soit totalement exempt dudit solvant complexant,

10 et, dans un second temps, à adjoindre ledit co-catalyseur audit complexe organométallique ainsi préparé.

9. Procédé de préparation d'un système catalytique selon la revendication 8, caractérisé en ce qu'il consiste, dans ladite première étape dudit premier temps, à utiliser du butyl lithium à titre d'alkyl lithium pour la préparation dudit complexe organométallique.

10. Procédé de préparation d'un système catalytique selon la revendication 8 ou 9, caractérisé en ce qu'il consiste, dans ladite seconde étape dudit premier temps, à utiliser du tétrahydrofuranne à titre de solvant complexant.

20 11. Procédé de préparation d'un système catalytique selon l'une quelconque des revendications 8 à 10, caractérisé en ce qu'il consiste, dans ladite seconde étape dudit premier temps, à faire réagir deux moles dudit sel de lithium avec une ou deux moles dudit trihalogénure de lanthanide.

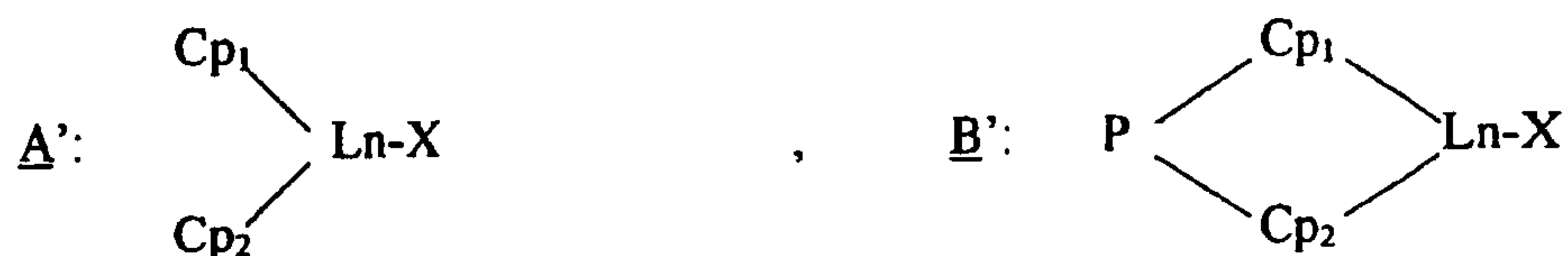
12. Procédé de préparation d'un système catalytique selon l'une quelconque des revendications 8 à 11, caractérisé en ce qu'il consiste, dans ladite troisième étape dudit premier temps, à utiliser le toluène ou l'heptane à titre de solvant non complexant.

13. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué, consistant à faire réagir un système catalytique dans un solvant



hydrocarboné inerte en présence de l'éthylène et du diène conjugué, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser un système catalytique comprenant:

- d'une part, un complexe organométallique représenté par l'une des formules génériques suivantes A' ou B':



où Ln représente un métal d'un lanthanide dont le numéro atomique varie de 57 à 71,

où X représente un halogène,

où, dans la formule A', sont reliées audit métal Ln deux molécules de ligands Cp<sub>1</sub> et Cp<sub>2</sub> identiques ou différentes, constituées chacune d'un groupe cyclopentadiényle ou fluorényle qui est substitué ou non,

où, dans la formule B', est reliée audit métal Ln une molécule de ligand, constituée de deux groupes cyclopentadiényle ou fluorényle Cp<sub>1</sub> et Cp<sub>2</sub> qui sont substitués ou non et qui sont reliés entre eux par un pont P répondant à la formule MR<sub>2</sub>, où M est un élément de la colonne IVA de la classification périodique de Mendeleev, et où R est un groupe alkyle comprenant de 1 à 20 atomes de carbone,

et

- d'autre part, un co-catalyseur qui est choisi parmi un alkyl magnésium, un alkyl lithium, un alkyl aluminium, et un réactif de Grignard, ou qui est constitué d'un mélange de ces constituants.

14. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon la revendication 13, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser à titre de complexe organométallique un complexe représenté par ladite formule générique A'.

15. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon la revendication 13, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser à



titre de complexe organométallique un complexe représenté par ladite formule générique B'.

16. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon la revendication 15, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser le silicium à titre de métal M compris dans ledit pont P de formule  $MR_2$ .

17. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon l'une quelconque des revendications 13 à 16, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser le néodyme à titre de lanthanide Ln dans ledit complexe organométallique.

10 18. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon l'une quelconque des revendications 13 à 17, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser à titre de complexe organométallique un complexe dans lequel  $Cp_1$  et  $Cp_2$  sont identiques, chacun d'eux comprenant un groupe cyclopentadiényle.

19. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon la revendication 18, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser à titre de complexe organométallique un complexe dans lequel  $Cp_1$  et  $Cp_2$  sont chacun constitués d'un groupe cyclopentadiényle qui est substitué par un radical alkyl ou alkyl silyl.

20 20. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon la revendication 14, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser à titre de complexe organométallique un complexe dans lequel ledit groupe cyclopentadiényle est substitué par un radical alkyl silyl,  $Cp_1$  et  $Cp_2$  répondant chacun à la formule  $(C_5H_4)(SiMe_3)$ , où Me représente un groupe méthyle.

21. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon la revendication 15, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser à

titre de complexe organométallique un complexe dans lequel ledit groupe cyclopentadiényle est substitué par un radical alkyl silyl,  $Cp_1$  et  $Cp_2$  répondant chacun à la formule  $(C_5H_4)(SiMe_3)$ , où Me représente un groupe méthyle.

22. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon l'une quelconque des revendications 13 à 17, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser à titre de complexe organométallique un complexe dans lequel  $Cp_1$  et  $Cp_2$  sont identiques, chacun d'eux comprenant un groupe fluorényle.

10 23. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon la revendication 14, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser à titre de complexe organométallique un complexe dans lequel  $Cp_1$  et  $Cp_2$  sont chacun constitués d'un groupe fluorényle non substitué qui répond à la formule  $C_{13}H_9$ .

24. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon la revendication 15, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser à titre de complexe organométallique un complexe dans lequel  $Cp_1$  et  $Cp_2$  sont chacun constitués d'un groupe fluorényle non substitué qui répond à la formule  $C_{13}H_8$ .

20 25. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon l'une quelconque des revendications 13 à 24, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser à titre d'alkyl magnésium, d'alkyl lithium, d'alkyl aluminium et de réactif de Grignard dans le groupe parmi lequel est choisi ledit co-catalyseur, respectivement du butyloctyl magnésium, du butyl lithium, de l'hydruure de diisobutyl aluminium, et du chlorure de butyl magnésium.

26. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon l'une quelconque des revendications 13 à 24, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser à titre de co-catalyseur un co-catalyseur constitué d'un



mélange d'un alkyl aluminium et d'un alkyl lithium qui sont présents en quantités sensiblement stoechiométriques dans ledit mélange.

27. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon l'une quelconque des revendications 13 à 26, caractérisé en ce qu'il consiste à réaliser la réaction de polymérisation au moyen dudit système catalytique en suspension ou en solution, à une température comprise entre 20°C et 90°C.

10 28. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon l'une quelconque des revendications 13 à 27, caractérisé en ce qu'il consiste à réaliser cette réaction de telle manière que le rapport du nombre de moles dudit co-catalyseur sur le nombre de moles dudit complexe organométallique soit compris entre 2 et 100.

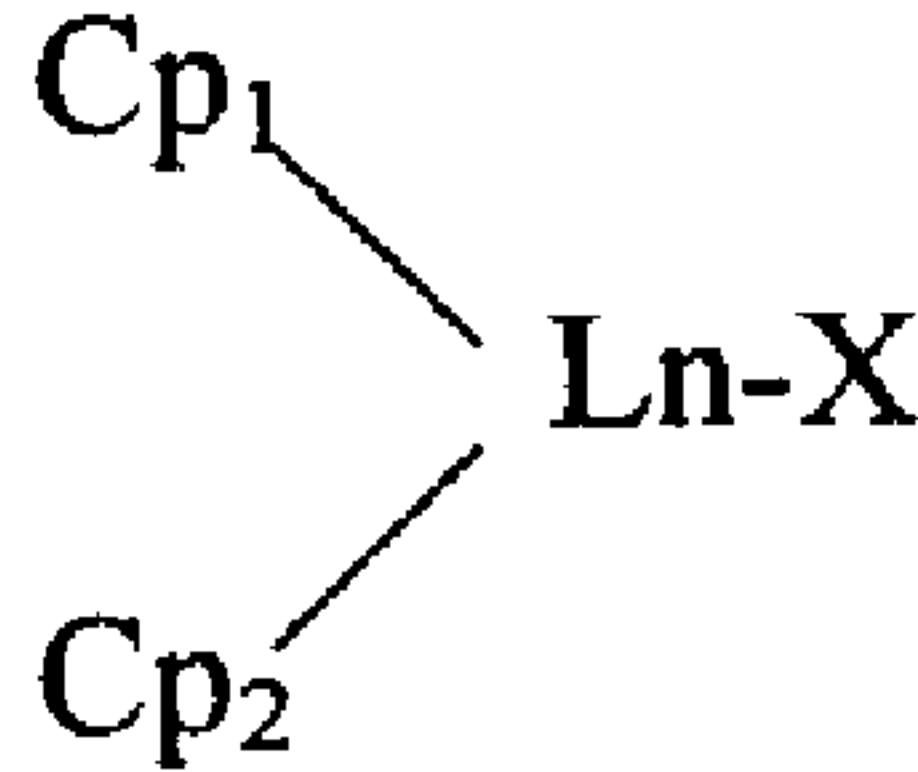
29. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon l'une quelconque des revendications 13 à 28, caractérisé en ce qu'il consiste à réaliser cette réaction de telle manière que la concentration en lanthanide Ln du milieu réactionnel soit inférieure à 0,3 mmol/l.

20 30. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon l'une quelconque des revendications 13 à 29, caractérisé en ce qu'il consiste à réaliser cette réaction de telle manière que la fraction molaire de diène conjugué dans le copolymère soit comprise entre 1% et 80%.

31. Procédé de préparation d'un copolymère d'éthylène et d'un diène conjugué selon l'une quelconque des revendications 13 à 30, caractérisé en ce qu'il consiste à utiliser à titre de comonomère diène conjugué le butadiène ou l'isoprène.



A:



B:

