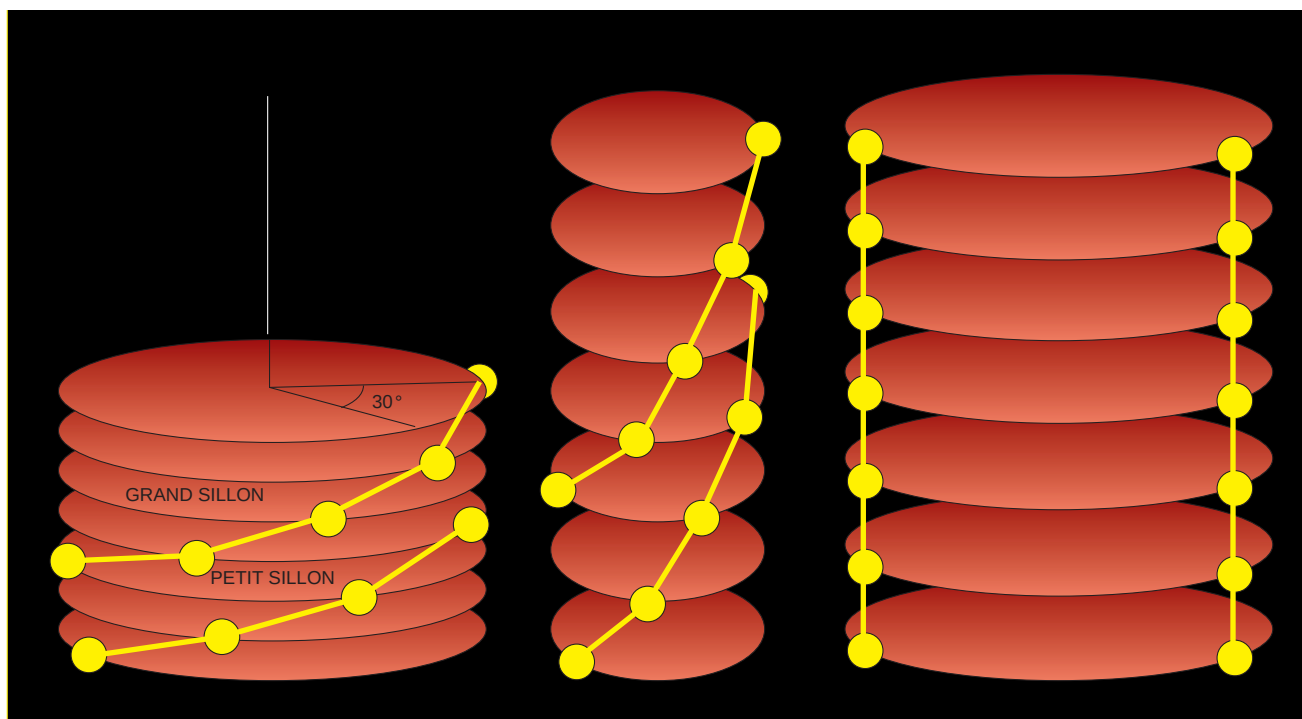




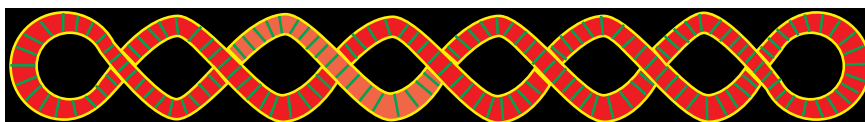
2. L'ÉTIREMENT DE L'ADN (en jaune) peut, selon les cas, conduire à deux types de structures : soit le diamètre de la molécule est réduit, soit la molécule se déroule. Le type de déformation effectivement

observé dépend des extrémités de la molécule sur lesquelles les forces de traction sont exercées. Sur cette figure, on a représenté par des sphères jaunes les points d'attache des bases.

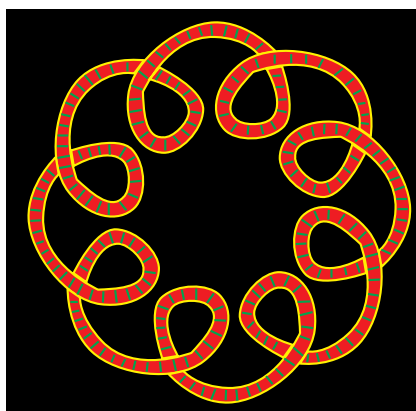
double hélice. Un exemple très révélateur a été la découverte des vagues de superhélicité positives et négatives engendrées par le déplacement de l'enzyme nommée ARN polymérase (voir la figure 5) : cette dernière, qui synthétise l'ARN à partir de l'ADN, forme un gros complexe de forte inertie avec la chaîne naissante d'ARN sur laquelle des structures nommées ribosomes commencent à se fixer afin de fabriquer les protéines codées par les gènes. Cette inertie peut même être renforcée par un attachement à des membranes,

comme dans le cas de la synthèse de protéines qui sont excrétées par les cellules ou qui vont se loger dans les membranes. Lorsque le complexe formé autour de l'ARN polymérase se déplace le long de la molécule d'ADN, afin de transcrire l'ADN en ARN, il conserve son orientation, en raison de sa liaison à la membrane, de sorte que c'est la double hélice qui tourne autour de son axe. Toutefois, la double hélice ayant également une forte inertie, le déplacement de l'ARN polymérase augmente la torsion (suren-

roulement) en avant du complexe de transcription et la diminue (déroulement) en arrière. Ces modifications devraient ralentir considérablement la progression de l'ARN polymérase, qui aurait à dérouler une hélice excessivement tordue. Cependant des enzymes cellulaires nommées topo-isomérases relaxent ces tensions de surenroulement ou de déroulement en coupant un des brins et en laissant les deux brins tourner l'un autour de l'autre jusqu'à ce que la torsion soit nulle. Ces actions enzymatiques ont un délai d'action, de sorte que la propagation et l'interaction de ces contraintes locales peut favoriser ou inhiber l'expression des gènes voisins.



3. LA DOUBLE HÉLICE d'ADN est généralement sous-enroulée d'environ cinq pour cent, ce qui la conduit à présenter des entortillements analogues à ceux des cordons de téléphone. Ces structures qui se nomment plectonèmes sont, selon les conditions, linéaires (en haut) ou solénoïdales (en bas). Ces entortillements engendrent des zones de forte courbure et des zones de courbures réduites (respectivement les extrémités et la partie centrale de la structure ci-dessus), que diverses enzymes peuvent modifier. Les biologistes découvrent aujourd'hui que ces parties de courbure différente de la courbure moyenne résultent de la séquence particulière de l'ADN, c'est-à-dire de la nature des sous-unités dont l'enchaînement constitue l'ADN.



Les deux élasticités de l'ADN

Dans cet article, nous examinerons l'importance des techniques de physique dans l'étude des propriétés d'élasticité de l'ADN. Nous envisagerons successivement les propriétés d'extensibilité et de superhélicité.

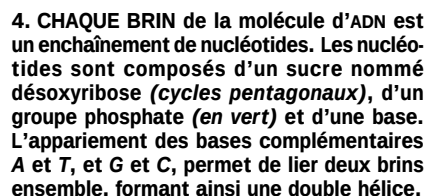
Pour étudier l'élasticité d'une molécule telle que l'ADN, il faut pouvoir l'attraper par les deux bouts. C'est possible avec l'ADN, car les biologistes maîtrisent l'utilisation des enzymes qui coupent, qui réparent, qui acco-

Le second régime est celui des forces faibles : les nombreux chocs des molécules d'eau contre la molécule d'ADN replie cette dernière en une pelote qui fluctue sans cesse ; quand on étire cette pelote, les chocs perpendiculaires à la direction d'étirement sont plus efficaces que ceux qui s'exercent dans la direction d'étirement et tendent à raccourcir la molécule, ce qui conduit à une élasticité du même type que celle qui est responsable des spectaculaires propriétés élastiques du caoutchouc (on décrit également cette force par la notion d'entropie : dans la configuration naturelle, les fluctuations conduisent à un désordre, ou entropie, maxi-

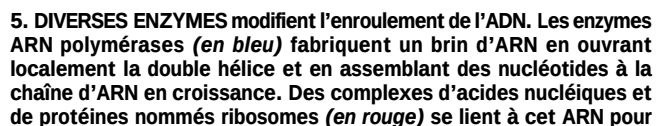
Tant que l'extension de la molécule d'ADN est faible, seule l'élasticité entropique joue un rôle, mais dès que cette extension est du même ordre de grandeur que la longueur de la molécule, l'élasticité intrinsèque des liaisons chimiques domine. La transition entre les deux régimes se fait pour une force de dix piconewtons environ (dix millièmes de milliardième de newton).

Les premières mesures de ce type ont été effectuées en 1992, par Carlos Bustamante et ses collègues de l'Université de l'Oregon. Ils utilisaient une combinaison de forces hydrodynamiques et magnétiques exercées sur une bille magnétique ; celle-ci était fixée à l'extrémité d'un brin d'ADN qui était attaché par l'autre extrémité à une lamelle de microscope. La bille était ainsi soumise à trois forces : une force hydrodynamique créée par l'écoulement d'un liquide, une force magnétique créée par un aimant, et la force d'élasticité de l'ADN. En variant la force hydrodynamique, les physiciens américains ont observé que la bille prenait diverses positions d'équilibre à partir desquelles ils ont constitué un diagramme où l'extension était portée en fonction de la force

Ce type d'expériences nécessite des calibrations (pour chaque type de forces) difficiles, notamment en raison des interactions de l'ADN, de la bille



et des parois. Néanmoins ces expériences ont une remarquable sensibilité dans le domaine des très faibles forces (inférieures à un piconewton). Les essais de traction sur l'ADN se terminent souvent lorsque la liaison la



assembler les protéines codées par les gènes. Comme l'ADN est généralement tenu à ses extrémités, et comme l'ARN polymérase a une forte inertie, la chaîne d'ADN est entortillée par la transcription. Des enzymes nommées topo-isomérases, devant et derrière l'ARN polymérase, ouvrent l'ADN et le détortillent.