

LES LOIS D'ÉVOLUTION DES SYSTEMES TECHNIQUES

(Fondements de la Théorie d'Évolution des Systèmes Techniques)

Y.P. Salamatov, 1991-1996

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	3
2. NAISSANCE ET EVOLUTION DE LA TECHNIQUE.....	6
2.1. Inéluctabilité de l'apparition de la technique.....	6
2.2. Schéma d'évolution des outils de production.....	7
2.3. Exemples tirés de l'histoire de la technique	10
3. SYSTEME TECHNIQUE : NOTION, DEFINITION, PROPRIETES.....	32
3.1. Définition globale d'un système technique	32
3.2. Fonctionnalité.....	33
3.3. Intégrité	36
3.4. Organisation.....	46
3.5. Propriété systémique	51
4. LOIS D'EVOLUTION DES SYSTEMES TECHNIQUES.....	54
4.1. Généralités	54
4.2. Lois en tant que base de TRTS	55
4.3. INTEGRALITE DES PARTIES.....	56
4.4. LIBRE PASSAGE DE L'ENERGIE.....	63
4.5. CONCORDANCE DU RYTHME DES PARTIES.....	70
4.6. DYNAMISATION DES SYSTEMES TECHNIQUES	91
4.7. AUGMENTATION DU DEGRE DE VEPOILISATION DES SYSTEMES... ..	99
4.8. DEVELOPPEMENT INEGAL DES SYSTEMES.....	105
4.9. TRANSITION DU MACRO-NIVEAU AU MICRO-NIVEAU	107
4.10. TRANSITION VERS LE SUPER-SYSTEME.....	118
4.11. AUGMENTATION DU DEGRE D'IDEALITE	130
5. SCHEMA GENERAL D'EVOLUTION DES ST	161
ANNEXES	167
ABREVIATIONS	167
EXPLICATIONS.....	167
LISTE DE FIGURES.....	170

1. INTRODUCTION¹

L'hypothèse principale de TRIZ, qui stipule qu'il existe une indépendance relative entre les processus de conception de nouveaux systèmes techniques et la volonté de l'homme, ne provoque plus aujourd'hui d'objections aussi passionnées qu'autrefois. Il faut avouer, cependant, que dans les milieux scientifique et industriel, on pense encore souvent que l'influence de l'individu est prédominante sur le caractère progressif des évolutions de la technique : "Je suis celui qui innove (conçoit, fabrique) les systèmes techniques, c'est pourquoi tout dépend de moi : si telle est ma volonté, je ferai ainsi ou autrement, le talent peut tout ! (...)"

Des trois domaines de la créativité humaine – science, technique et art – la science est le premier domaine à être privé de l'aura de l'exclusivité personnelle. Si Newton n'était pas né, quelqu'un d'autre aurait quand même formulé la loi de la gravité. Un axiome faisant de nos jours partie de la culture élémentaire d'un chercheur énonce que la science étudie des lois objectives ; par conséquent, ces lois, à la condition qu'elles soient correctement établies, sont toujours identiques, indépendamment de celui qui les découvre : bien qu'exprimées sous une forme différente, ces lois font apparaître le même contenu. Par conséquent, la voie d'évolution de la science est prédéterminée et personne ne peut la changer. Toutefois, à la différence des chercheurs, les innovateurs ne soupçonnent pas l'existence de ces lois dans l'évolution de la technique.

Cependant, pour l'essentiel, les concepts de la créativité, qu'ils relèvent de la science ou de la technique, sont très proches : l'objectif de la science consiste à obtenir des connaissances sur les propriétés de la matière ; la technique, quant à elle, cherche à utiliser ces propriétés en vue de satisfaire les besoins de l'homme et de la société. De ce fait, la technique va matérialiser les connaissances produites par la science. Ainsi, sans technique, nombre d'activités sont impossibles. On constate en effet que la civilisation perçoit sa destinée principalement au travers des transformations et des adaptations de son milieu : en plus de son milieu naturel, l'homme a conçu un milieu intermédiaire, artificiel (constitué, par exemple, de son habitation) pour se protéger ; celui-ci est sans danger et fondé sur des données scientifiques objectives. L'évolution de la technique, en tant qu'élément de l'évolution progressive de la civilisation, est un processus historique autonome soumis à des lois, qui non seulement ne sont pas dépendantes de la volonté de l'homme, de sa conscience et de ses intentions, mais bien au contraire les déterminent.

Dans cette réalité, deux processus d'évolution opposés se confrontent :

- l'évolution de la dispersion, de la dégradation, de la désintégration, autrement dit, l'évolution du complexe vers le simple. Ceci caractérise une évolution entropique (découverte par Rudolf Clausius et Ludwig Boltzmann et formulée dans le deuxième principe de la thermodynamique) ;
- l'évolution de la vie, le développement et l'auto-organisation de la substance animée de la planète, autrement dit, une évolution du simple vers le complexe. Il s'agit ici d'une évolution neg-entropique (rappelons que les lois d'évolution biologique ont été découvertes et formulées par Charles Darwin).

¹ Revue par Roland DeGuio et par Nathalie Gartiser, 2001-2002

Toutefois, l'évolution technique s'avère être une composante indissociable de l'évolution de la vie.

La connaissance d'au moins une partie de l'évolution technique facilitera considérablement à l'humanité l'atteinte de ses objectifs. Les lois d'évolution naturelle de la matière, établies par la science, ont toujours porté leurs fruits : la théorie de James Clerk Maxwell, la classification de D.I. Mendeleïev, la théorie de la structure de A.M. Butlerov et beaucoup d'autres ont abouti à une évolution par à-coups de leurs domaines de connaissances. Les lois d'évolution d'un milieu artificiel (évolution technique) sont plus difficiles à trouver, étant donné qu'elles n'ont pas d'équivalents dans les sciences naturelles. Elles représentent en effet un niveau systémique qualitativement supérieur aux lois de la nature, mais s'appuyant entièrement sur elles.

A l'opposé de la vision totalement anthropocentrique de l'innovation, on trouve un point de vue différent mais tout aussi radical : la technique évolue toute seule sans participation de l'homme ; même si les hommes jouent un rôle dans son évolution, il n'est pas plus important que le rôle que joue l'abeille dans la nature en transportant le pollen d'une fleur à une autre. Le déroulement de l'évolution technique obéissant, à ses lois aveugles, énigmatiques et mystérieuses, est-il aussi strictement prédéterminé ?

Oui et non. L'homme peut couper une branche dans l'évolution de la technique (par exemple, dans l'armement), il peut se réorienter d'une machine vers une autre à des fins d'évolution, il peut aller pendant un moment "à contre-courant" dans la technique ou devancer considérablement la science, mais il lui est impossible de changer les lois naturelles. Par exemple, l'aptitude de la lumière à choisir une trajectoire à travers différents milieux de sorte que son temps de passage y soit minimal (principe de Fermat) fera construire des appareils optiques en conséquence ; mais, et c'est le plus important, si l'on parcourt toute l'histoire de l'évolution de la technique optique, on pourra observer une certaine constante dans son évolution, obéissant à une loi universelle. On obtient des résultats encore plus spectaculaires en comparant les enchaînements d'évolution de plusieurs systèmes techniques différents : on aboutira à certaines lois d'évolution communes. Il est imaginable d'aller encore plus loin en essayant d'analyser l'évolution de l'ensemble des domaines de la technique et en concevant un modèle d'évolution technique universel ; ceci correspond, au fond, aux idées principales simples et compréhensibles de la méthodologie de recherche des lois d'évolution technique. A.P. Tchekhov a exprimé une idée très proche de ce concept : "On pourrait réunir les meilleures créations d'artistes peintres de toutes les époques et, en utilisant une méthode scientifique, saisir le caractère général de ce qui les rend ressemblantes et de ce qui détermine leur valeur. C'est ce caractère général qui sera loi..." (De la lettre à A.S. Souvorinov, le 3 novembre 1888). Ajoutons simplement que les "œuvres immortelles" dans la technique seront des innovations importantes d'un point de vue heuristique assurant un bond qualitatif dans l'évolution des systèmes techniques.

Or, la technique est créée par l'homme, par conséquent, elle est subjectivement déterminée par lui, tandis que l'évolution de la société en général est un processus historique et objectif. Comme les actions subjectives de l'homme ne s'accordent pas toujours avec des lois objectives d'évolution, seuls les résultats d'actions humaines qui reflètent des lois objectives existantes sont utiles et viables.

Il est évident que la connaissance des lois d'évolution des systèmes techniques permettra d'économiser beaucoup de forces, d'énergie et de temps. Le plus important est que cela créera les conditions nécessaires pour réaliser au moins partiellement le rêve éternel de l'humanité : contrôler des processus naturels et sociaux en se basant sur des prévisions exactes à long terme. Comme l'affirmait l'un des personnages de M. Boulgakov : "Excusez-moi,

répondit doucement l'inconnu, pour pouvoir diriger il faut avoir, qu'on le veuille ou non, un plan précis pour un horizon plus ou moins acceptable. Permettez-moi de vous demander comment un homme peut diriger non seulement s'il est privé de toute possibilité d'élaborer un plan pour un avenir dérisoire, disons, d'au moins un millier d'années, et si de plus, il ne peut même pas garantir son propre avenir ? ..."

Toutes les sciences naturelles se prêtent à cette démarche de prévision à long terme. On dispose d'exemples remarquables. Ainsi, K.E. Tsiolkovski a créé un système de prévisions des voyages de l'homme dans l'espace – 16 étapes en tout et les 11 premières se sont déjà réalisées. Il a anticipé sur les besoins de l'humanité : en tenant compte des simples lois physiques et astrophysiques, il a choisi le seul chemin progressif cosmique possible de notre civilisation – il ne pouvait en être autrement.

2. NAISSANCE ET EVOLUTION DE LA TECHNIQUE

2.1. Inéluctabilité de l'apparition de la technique

La technique a vu le jour en même temps que la société. Elle doit sa naissance à l'homme pour qui elle était un moyen de rompre son assujettissement à la nature et de satisfaire ses besoins biologiques et sociaux. Cependant, la technique formait également l'homme et déterminait les conditions nécessaires à l'apparition de nouveaux besoins. Il faut noter qu'à la différence des animaux, les besoins de l'homme ont tendance à s'accroître constamment (à ce jour personne n'a expliqué l'essence de cette expansion illimitée ni l'égoïsme de la civilisation...). Tant qu'ils ne sont pas satisfaits, l'homme est mécontent. Le monde ne le satisfait pas et il décide donc de le changer. Pour parvenir à cette fin, les forces humaines sont cependant limitées. Il faut des moyens supplémentaires et différents, destinés à multiplier les forces productives de l'homme.

A l'aube de la culture, les forces productives étaient infimes. Mais les besoins étaient également minimes. En général, ils se limitaient à se nourrir. Pour trouver de la nourriture d'origine végétale, l'homme utilisait ses mains, parfois des pierres et des bâtons prolongeant le bras. L'accroissement de la population a fait sentir l'insuffisance de ce type d'alimentation et l'homme a été obligé de chasser et de débriter les corps des animaux tués. Toutefois, il manquait de force naturelle pour cela. Alors, il a eu besoin d'outils qui augmentaient ses possibilités. Ainsi dans l'environnement ont été découverts des objets ayant des fonctions utiles à l'homme, notamment des bâtons pointus, débris de pierres avec des bords tranchants. Cependant ces objets se cassaient, s'émoussaient, se perdaient. Il fallait les chercher, les stocker, les réparer ce qui a donné naissance au processus de fabrication de moyens de travail. La technique est apparue à ce moment-là. Le système social en cours de formation créait les parties manquantes en utilisant des éléments de la nature. L'homme découvrait les propriétés des objets, accumulait progressivement des connaissances et commençait à les appliquer à des buts précis. Ainsi, seul le quartz servait à la fabrication des outils, car ces pierres étaient dures (presque comme le diamant) et se fendaient facilement en lames avec des bords tranchants. Le bras et plus particulièrement la main évoluaient en synchronisme avec les outils de travail.

Vers le début de la période glaciaire (il y a 100 mille ans) sont apparues les premières colonies installées à demeure près de l'eau, sur les lisières, dans les grottes et les cavernes. Le climat se refroidissait de plus en plus, les glaciers descendaient du Nord – il fallait se protéger de la nature impitoyable. L'homme a commencé par utiliser le feu qu'il apportait dans la colonie grâce aux incendies de forêt, puis a appris à le maintenir. Le feu assurait à l'homme la protection contre le froid et l'humidité, contre les attaques des animaux sauvages. Cuir et rôti la viande ont facilité le processus de mastication et de digestion. Les mâchoires se sont réduites, le cerveau a accéléré son développement. L'homme a eu plus de temps et d'énergie pour mener une démarche active et curieuse face à la nature. Pour la première fois, il a utilisé pour satisfaire ses besoins une énergie gratuite fournie par son environnement. L'utilisation du feu comme moyen de transformation de l'énergie chimique en énergie thermique était la deuxième étape fondamentale, après les outils en silex, dans l'évolution de la société. L'invention du moyen d'allumer le feu (par une étincelle de silex, par le frottement du bois) a définitivement séparé l'homme de l'animal. Ce fut une invention déterminante qui a marqué le moment de la formation définitive de l'Homo sapiens (il y a 30 à 40 mille ans). A cette époque, la technologie de fabrication des outils en pierre a atteint la perfection. Son évolution tendait à augmenter la fonction utile de l'outil de travail, notamment à rendre la forme plus

pratique pour travailler et à aiguiser le côté tranchant. A cette époque, ont été inventés les premiers outils composés comme le dard (hampe de bois se terminant par un bout en pierre) et la hache. En même temps a été inventée la façon d'attacher la lame de hache au manche à l'aide de lanières de cuir. La hache est devenue un des outils principaux de l'homme préhistorique.

Ce qui étonna pendant longtemps les spécialistes au cours des fouilles archéologiques était qu'ils trouvaient les mêmes outils sur toute la surface habitable de la Terre. Ce n'est pas dû au hasard. Des groupes différents d'hommes préhistoriques avaient les mêmes besoins et utilisaient pour les satisfaire les mêmes objets de la nature. De manière identique, les bouleversements de la Terre obligeaient l'homme à s'adapter et à chercher des solutions dans l'invention. Des contradictions similaires entre l'homme et la nature se résolvaient avec les mêmes moyens, par un processus d'essais-erreurs.

Ainsi, la naissance et l'évolution de la technique résultent des contradictions entre les objectifs déterminés par les besoins et les moyens nécessaires à la réalisation de ces objectifs. Si de telles contradictions n'existaient pas, si la société se satisfaisait de moyens déjà existants pour atteindre ses buts, alors rien n'obligerait les hommes à créer de nouvelles techniques dans un domaine d'activité quel qu'il soit. Cependant une telle situation n'a jamais eu lieu dans l'histoire de l'humanité : l'homme ne s'est jamais satisfait de ses résultats. Les contradictions ont toujours existé et il n'y a aucune raison de douter qu'elles disparaissent dans l'avenir. Ces contradictions font partie des "contradictions éternelles" : tout de suite après qu'elles aient été résolues, elles réapparaissent à une autre étape de l'évolution. Les contradictions s'accumulent, s'accroissent et se résolvent. Toute résolution d'une contradiction nécessite des modifications, notamment l'adaptation et l'évolution de l'homme lui-même (par exemple son passage à la station verticale, le développement de ses mains et de son cerveau), la transformation de l'environnement (apparition de l'agriculture, de l'élevage, de la construction), le changement de la société (de ses structures, de ses liens, de ses fonctions et de ses repères sociaux) ou bien "l'achèvement" de l'homme et de la société, c'est-à-dire l'extension de leurs possibilités fonctionnelles, par la création "d'organes" techniques artificiels.

2.2. Schéma d'évolution des outils de production

Qu'est-ce que la technique ? Qu'est-ce qu'un système technique ? Est-ce qu'une hache, un arc, un chariot sont des systèmes techniques ? Et une branche, un bâton, une massue ? Avant de répondre à ces questions, faisons un bref aperçu historique de l'apparition et de l'évolution des outils de production dans la société humaine. En résumant toutes les informations et les notions connues à ce jour sur la naissance et l'évolution de la technique au cours de toute l'histoire de l'humanité et en les interprétant selon TRIZ, on obtient le schéma présenté dans la figure 1.

1. Les premiers moyens d'action sur les objets de travail étaient les organes du corps humain : recherche et préparation de la nourriture, creusement de trous, montage de murs en pierres. La forme la plus simple des outils de production qui ont une fonction passive sont des constructions. D'abord, elles sont apparues suite à l'activité naturelle des hommes (sentiers, routes), puis elles ont été érigées dans un but précis (bâtiments, tumulus, pyramides).

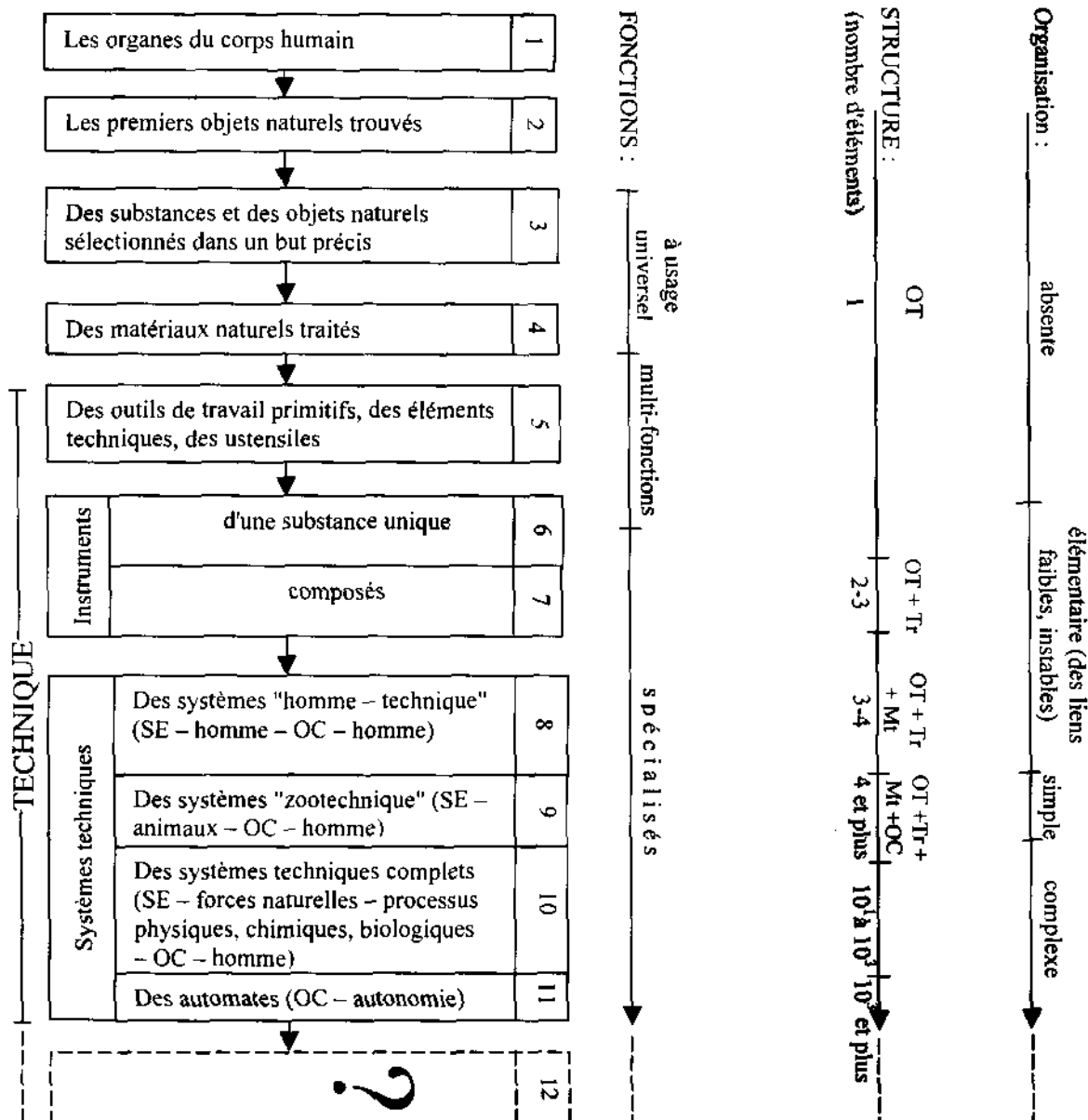


Fig. 1. Schéma d'évolution des outils de production

Il est possible de rencontrer des constructions également chez les animaux : digues et canaux chez les castors, nids chez les oiseaux, terriers chez certains animaux.

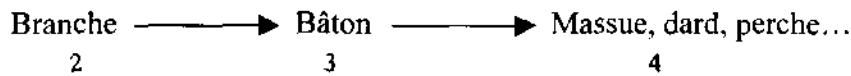
Puis l'homme a "prolongé", "renforcé" ses membres à l'aide de divers objets naturels.

2. Utilisation des premiers objets naturels qui sont à portée de main. En construisant sa hutte, l'homme a commencé à utiliser des branches, des peaux, des os, des pierres.

3. Utilisation de substances et d'objets choisis dans un but précis, pour remplir un grand nombre de fonctions (un os pointu, un bâton, un éclat de pierre). C'est une période d'une grande importance au cours de laquelle l'homme essayait de comprendre les liens possibles entre les propriétés des substances naturelles et ses objectifs de travail.

4. Utilisation de matériaux naturels traités pour remplir une fonction spécifique. C'est là que trouve son origine l'adaptation de matériaux aux processus concrets de travail : grattoir, lanières et sacs de cuir, ustensiles en os, paniers d'osier, d'aubier, de roseau. Cette période

consiste à comprendre les propriétés des matériaux et à les utiliser pour accomplir des fonctions précises et utiles. Au-delà d'être une ramification de l'arbre, une branche peut devenir un bâton qui va servir de massue, de dard, de perche...



5. *Utilisation d'outils de travail primitifs* (levier, mortier, grattoirs en pierre, couteaux, forets, perceurs), *d'éléments techniques conçus dans des buts précis* (levier, rouleau, axe, roue), *d'ustensiles, d'outillage* (vaisselle, radeau, bateau creusé, skis, luge). Ces outils de travail n'étaient pas encore spécialisés et s'utilisaient de différentes manières. Ils remplissaient des fonctions différentes : coupe, perçage, sciage, polissage. La partie active de ces outils de travail, maintenant bien définie, se transformera par la suite en organe de travail.

La mise en évidence et le renforcement d'une fonction utile ont donné lieu à une spécialisation accélérée des outils de travail, ce qui a abouti à l'apparition du **premier élément des systèmes techniques : l'organe de travail (OT)**. A partir de ce moment-là, la technique est apparue en tant que phénomène de la société humaine.

Les étapes 1 à 3 de la figure 1 sont spécifiques au monde animal. La phase 4 est une période singulière dans l'histoire de la vie sur Terre, propre uniquement à l'Homo sapiens. L'homme a appris à utiliser et à allumer le feu. Cependant, les outils de travail restent rudimentaires. Seule la période correspondant au point 5 du schéma peut être attribuée avec assurance à l'apparition de la technique.

6-7. *Les instruments, outils de travail spécialisés et par conséquent plus diversifiés*, sont apparus il y a environ 10 mille ans. Ces instruments sont issus d'une substance unique comprenant des parties bien définies : la zone de l'organe de travail (la pointe) et la zone de transmission (le manche). Ces instruments résultent d'une transformation effective et dans un but précis des objets de travail : transformation d'un matériau ou d'un objet naturel en produit. Par exemple, sont apparus des couteaux en silex, des ciseaux, des forets, des piques, des alènes, des aiguilles en os.

Les premiers instruments composés (perceur en pierre avec une monture en os ou en bois, flèche et dard garni d'une pointe, faucille – un grand couteau composé de plusieurs lames repliables en pierre) étaient mal assemblés, fragiles et se cassaient. *Le premier véritable instrument composé*, constitué d'une substance segmentée en parties distinctes qui sont ré-assemblées de manière différente, fut une hache. L'apparition de tels instruments a été un pas important vers la structuration des objets et le développement de liens entre les éléments. *La particularité essentielle de ce processus* consiste à décomposer tout d'abord la fonction principale en fonctions partielles. On recherche et on invente ensuite des moyens plus efficaces permettant de remplir ces fonctions. On obtient un avantage supplémentaire dans la fonction principale en réunissant les éléments remplissant les fonctions partielles en un tout unique.

A titre d'exemple, une hache lourde (accroissement de la fonction utile) était impossible à fixer dans une monture en bois, ce qui a engendré l'apparition d'un troisième élément : des lanières de cuir. Cependant elles tenaient mal et se dénouaient. *Une invention importante de cette époque a été le nœud* comme moyen d'attacher les lanières en les tirant.

Les combinaisons d'éléments les plus réussies étaient celles dont les propriétés se complétaient. Par exemple, la première vaisselle – des paniers et des cruches d'osier – contenaient difficilement l'eau et on ne pouvait pas les mettre sur le feu. Il s'est avéré par

hasard que les paniers enduits d'argile étaient plus solides, étanches et résistants au feu. Dans ce cas, la carcasse en bois jouait le rôle d'armature servant à consolider l'argile et l'argile protégeait le bois de la destruction. On a découvert par la suite que l'argile devenait encore plus solide cuite même si la carcasse extérieure en bois brûlait et disparaissait. C'est pour cette raison que les hommes se sont mis à fabriquer la poterie sans carcasse.

8-11. Utilisation de systèmes techniques comme des instruments munis d'un moteur.

Ce sont des objets techniques composés au minimum de trois parties : un organe de travail (OT), une transmission (Tr) et un moteur (Mt). Le quatrième élément, l'organe de commande (OC), comprend le plus souvent l'homme. Le cinquième élément, la source d'énergie (SE), peut être un homme, un animal, des forces naturelles, ainsi que des processus physiques, chimiques et biologiques naturels et artificiels.

Les premiers systèmes techniques furent le moulin, l'arc, le chariot, la montre et la balance.

2.3. Exemples tirés de l'histoire de la technique

2.3.1. Le moulin

Tout système technique a une longue histoire. Par exemple, avant d'aboutir au moulin que nous connaissons, l'utilisation des grains (de blé par exemple) a beaucoup changé :

- ❑ au début, on consommait le grain cru,
- ❑ puis, du grain détrempé,
- ❑ puis, du grain cuit,
- ❑ puis, du grain concassé à l'aide d'une pierre dans un mortier,
- ❑ puis apparut le premier moulin qui consistait à moudre le grain à la main à l'aide d'une meule manuelle,
- ❑ enfin le moulin s'est développé, sur le même principe en utilisant la force des animaux ou de la nature.

2.3.2. Fabrication de matériaux fibreux

De nombreux systèmes techniques modernes ont passé toutes les étapes de l'évolution de la technique.

Par exemple, le processus de fabrication de matériaux fibreux :

- ❑ utilisation de plantes à tiges, de crins, de tendons d'animaux, d'aubier des arbres comme moyen de consolidation,
- ❑ torsion par les mains (fabrication de cordes) sans instruments (fouet de chanvre, etc.),
- ❑ filage de fils de fibres à la main sans dispositif,
- ❑ filage de fils à l'aide d'un bâton,
- ❑ filage à la main à l'aide de fuseaux,

- rouet qu'on tournait à la main à partir des XII^e et XIII^e siècles,
- rouet avec une manivelle,
- rouet avec une pédale qui est apparu vers 1530,
- formes modernes de machines à filer,
- machine à filer "Jenny",
- métiers à filer,
- métiers à filer automatiques.

2.3.3. Le crayon (et d'autres instruments de dessin et d'écriture)

L'histoire de l'évolution du crayon peut être ainsi présentée :

- son ancêtre lointain : un tison éteint,
- dans l'Antiquité : une tige de plomb laissait une trace douce, gris clair sur une feuille de parchemin. Pour écrire, elle était trop claire, c'est pourquoi on l'utilisait uniquement pour tracer des lignes. Une tige constituée, de deux tiers de plomb et d'un tiers d'étain, travaillé au marteau, laissait un trait plus foncé. Avec le temps, sous l'action de l'oxygène contenu dans l'air, le trait se fonçait et s'effaçait facilement à l'aide de mie de pain ou de pierre ponce (la gomme n'a été inventée qu'au XVIII^e siècle) ;
- l'aristocratie utilisait des tiges d'argent. Un trait gris foncé brunissait en s'oxydant et devenait impossible à effacer. C'est pourquoi seuls les grands maîtres tels que Léonard de Vinci les utilisaient ;
- des tiges minérales (charbon de bois) apparurent ensuite. Une des recettes consiste à prendre des petits bâtons d'osier, à les raboter et à les tailler de deux côtés, à les poser ensuite dans un pot, à boucher le couvercle avec de l'argile pour le rendre hermétique et à mettre le pot dans un four le soir jusqu'au matin. Toutefois, le charbon tient difficilement sur le papier. Combien n'a-t-on pas tenté de corriger ce défaut ! On couvrait préalablement le papier d'une solution de colle et d'eau et on le laissait sécher. Après avoir rempli toutes les feuilles d'écriture ou de dessins, on les tenait au-dessus de la vapeur. Ainsi la couche de colle s'humidifiait et absorbait le charbon. Après le séchage, le texte ou le dessin était bien fixé ;
- au XV^e siècle, dans le Piémont, on a découvert la "pierre noire", la "craie noire"². Sa mise en exploitation se fit dans un délai stupéfiant mais le gisement s'est épuisé rapidement. Puis on a épuisé les gisements de Thuringe et d'Andalousie ;
- à Paris, il n'y avait pas de gisements, c'est pourquoi on a inventé un mélange d'argile blanc et de suie. On a obtenu un crayon particulier appelé crayon de Paris. Il était plus foncé que le crayon italien et abîmait moins le papier ;
- Léonard de Vinci a découvert la sanguine, la "craie rouge" : du kaolin naturel coloré par des oxydes de fer ;

² Les racines turques, "cara" et "dache" qui signifient respectivement "noir" et "pierre" forment le mot "karandache" qui veut dire en russe "crayon".

- s'il existe une craie noire et rouge, pourquoi ne pas en faire une de couleur ? Au XV^e siècle, en France, on a inventé le pastel – de la craie avec des additifs de pigments (craie + pigment + graisses ou de la gomme arabique ou du jus de figuier) façonnée en forme de cylindres sur des plaques de marbre puis mise à sécher. Certains bâtonnets étaient plus durs, d'autres plus mous ;
- tantôt dans un pays, tantôt dans un autre, on découvrait des mines de graphite. Au XVI^e siècle, le graphite a été découvert par hasard en Angleterre, dans un trou d'arbre déraciné. Les paysans ont commencé à l'utiliser pour marquer des moutons et des paniers. On a mis au point à Londres un commerce de bâtonnets de graphite entourés de ficelle. Puis le roi a élaboré une loi concernant ces mines de graphite : elles ne pouvaient être exploitées que six semaines par an pour ne pas les épuiser ; par ailleurs, le graphite ne pouvait être exporté que sous peine de mort. La mine a duré 200 ans...
- le crayon sous sa forme actuelle a été inventé au XVIII^e siècle par un Tchèque, J. Hardtmuth, propriétaire d'une usine fabriquant des ustensiles pour des laboratoires. Il laissa échapper un creuset durant un contrôle et observa une trace noire très nette laissée par un de ses éclats sur du papier. En se renseignant, Hardtmuth apprit que dans l'argile avait été ajouté du graphite. Après avoir effectué quelques expériences, il établit les bonnes proportions. Ainsi apparurent les fameuses mines "Koh-i-noor".

En 1790, indépendamment de Hardtmuth un Français, N. Conté, a également inventé un crayon. Il a suggéré de placer la mine dans une gaine de bois.

A ce jour, il existe 21 degrés de dureté d'un crayon. Dans la Fédération de Russie on utilise une gradation allant de 6T (68 % de kaolin), le plus dur, à 6M (80 % de graphite, 20 % de kaolin et une colle de pectine), le plus tendre³.

Pour simplifier la technologie et accroître la solidité, il faut substituer une résine synthétique au kaolin. La plasticité s'accroît, par conséquent il est possible de réaliser des mines très fines ne nécessitant aucun affûtage (0,5 mm au Japon et 1,2 en Russie).

Selon le brevet № 671 712 de la Fédération de Russie délivré à une société nipponne, on extrude sans cesse la mine et par-dessus on extrude la gaine en plastique, puis on coupe des crayons. La mine se compose de résine d'époxyde, de graphite, de stéarate de calcium et la gaine est faite de polyester en mousse.

A une époque, en URSS, on fabriquait des crayons "chimiques" qui en réalité se nomment crayons "à copier" et servent à remplir des documents au papier carbone. Un stylo à plume ne fournissait pas une pression suffisante sur le papier et laissait une trace indélébile, alors qu'un crayon permettait de pénétrer toutes les couches de papier et s'effaçait facilement. Un crayon "chimique" est un crayon avec des additifs de colorants (éosine, rhodamine et auramine) qui se dissolvaient avec l'humidité et pénétraient dans les fibres de papier.

D'autres brevets concernent des instruments à écrire. Le brevet № 11 575 (1928) porte sur un dispositif destiné à humecter la mine d'un crayon chimique (fig. 2a). Sur le crayon, se fixe un réservoir caoutchouté rempli d'eau qui, en appuyant dessus, humecte la mine par le biais d'une pièce en matériau capillairo-poreux. C'est le prototype d'un instrument à écrire qui n'est pas encore inventé : le "bâtonnet" qui écrit doit être humecté au moyen de l'eau contenue, par exemple, dans l'air ambiant.

³ [NDT] : T est la première lettre du mot "dur" en russe ; M est la première lettre du mot "tendre" en russe.

Néanmoins, la netteté, la finesse et la longévité de la trace du crayon ne peut être comparée aux dispositifs utilisant l'encre.

Les ancêtres de la plume étaient un bâtonnet biseauté utilisé dans l'écriture cunéiforme réalisée sur l'argile humide par des scribes assyriens et un bâtonnet pointu (stylos) utilisé en Grèce antique et à Rome pour écrire sur les plaques en cire.

La recette la plus ancienne de l'encre appartient aux Egyptiens. C'était un mélange de suie et d'huile pour écrire sur le papyrus. On utilisait une composition identique en Chine il y a deux mille cinq cents ans.

Les Egyptiens ont également inventé le premier instrument à écrire. Il ressemble d'ailleurs beaucoup à un feutre d'aujourd'hui et a été découvert dans le tombeau de Toutankhamon. C'était un stylo en cuivre contenant un tube effilé en plomb à l'intérieur duquel se trouvait un roseau rempli d'encre. L'encre s'infiltrait par les fibres de roseau, s'accumulait sur l'extrémité effilée et laissait une trace nette sur le papyrus lorsqu'on écrivait.

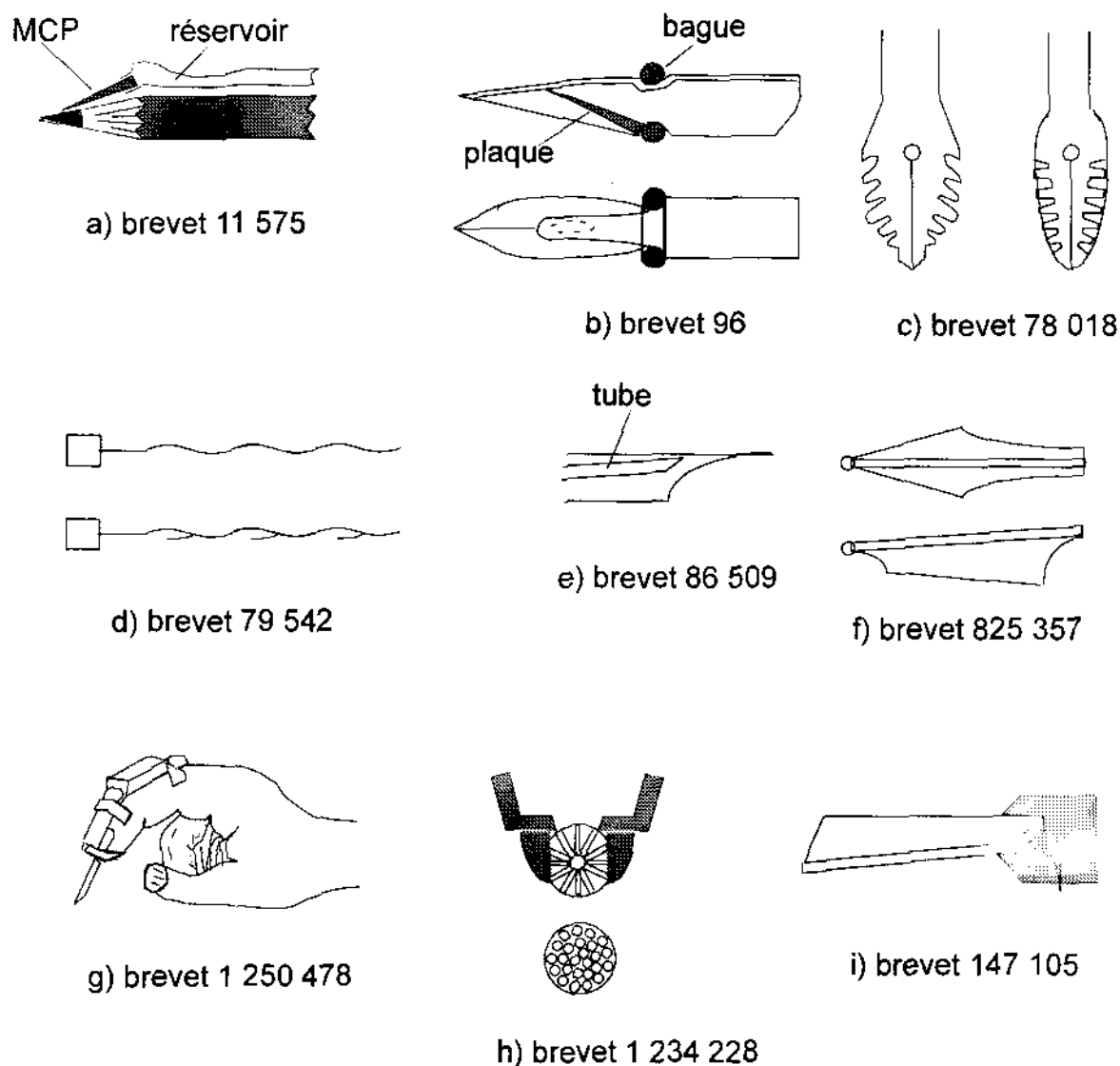


Fig. 2. Évolution des moyens d'écriture

Au III^e siècle av. J.-C. en Grèce et à Rome, on utilisait déjà différents types d'encre. L'encre rouge "de la cour" utilisée uniquement pour écrire des documents officiels (l'encre était rigoureusement surveillée par des gardiens spéciaux) était faite de pourpre et de cinabre. L'encre noire était fabriquée avec de la peinture noire, de la suie, des noyaux de fruits, des sarments, du charbon de bois et du charbon d'os. Un siècle plus tard, pour fabriquer l'encre, on utilisait l'eau de cuisson des écorces tannantes. Par la suite, ces deux types d'encre noire ont été nommés en Russie "encre fumée" et "encre cuite".

Au XVI^e siècle, on a inventé l'encre de fer (parfois encore utilisée de nos jours). Pour sa fabrication, on cuisait les racines et l'écorce d'aune, l'écorce de noisetier ou de chêne, des noix de galle (excroissances pathologiques sur les feuilles de diverses plantes) ; puis on plongeait du fer ou des objets inutiles en fer dans cette décoction. Afin de solidifier les encres pour qu'elles ne traversent pas le papier, on ajoutait de la colle de cerisier. Pour réduire leur viscosité on ajoutait de l'alun, du gingembre et des clous de girofle. Ce processus de fabrication durait deux semaines.

Au XVIII^e siècle, fut utilisée pour la première fois la couperose verte ; ce qui accéléra la fabrication des encres.

Le secret de la fabrication des encres a été percé après la découverte des acides tannants et déchiffré définitivement par un chimiste suédois Carl Wilhelm Scheele en 1876. Il a constaté que pendant la cuisson l'écorce d'aune dégageait dans l'eau des acides tannants avec lesquels le fer forme des sels ferreux de protoxydes. La solution est faiblement colorée, néanmoins, lors du séchage, le fer s'oxyde et fonce en formant de l'oxyde ferrique qui est insoluble dans l'eau et insensible à la lumière. Depuis, un grand nombre de recettes d'encres ont vu le jour, y compris celles des encres "éternelles" (vanadifères, Berzelius) et de l'encre invisible. Cependant des compositions nouvelles dans leur principe ne sont apparues qu'après l'invention des stylos à bille et des imprimantes.

Après le "feutre" égyptien tombé dans l'oubli, c'est une plume d'oie souple qui grinça durant des siècles sur le parchemin et le papier. Lorsqu'on s'apprêtait à écrire, on nettoyait la plume dans du sable brûlant, on la coupait et on la taillait. Le nombre d'utilisateurs augmentait rapidement. Il fallait davantage de plumes ; or, seulement deux ou trois plumes par aile pouvait être utilisées pour écrire. Par conséquent, il a fallu trouver le moyen de les économiser : on les découpait en plusieurs parties qu'on taillait. Il fallait souvent tremper la plume dans l'encre, cela prenait du temps et distrayait. On a même inventé quelque chose ressemblant à un stylo à plume moderne : un tube métallique rempli d'encre dont une extrémité se fermait et l'autre comportait une plume d'oie.

Le créateur de la première plume métallique⁴, à la fin du XVIII^e siècle, était un domestique du bourgmestre Janssen d'Aix-la-Chapelle. Pour faciliter le travail de son maître, il a fabriqué une plume en acier. Comme la plume n'avait pas de fente, elle crachait et écrivait sans pression. Avec l'invention de la plume d'acier avec une pointe fendue, la qualité de l'écriture s'est nettement améliorée et la popularité des plumes métalliques (en acier, en argent ou en or) s'est trouvée hors d'atteinte de la concurrence.

Il existe un grand nombre d'innovations visant à améliorer les stylos à plume. Les exemples ci-dessous présentent quelques solutions techniques tirées du fonds d'innovations russes (Classification Internationale d'Innovations, classe B43K).

⁴ [NDT] : On différenciera dans la suite du texte le stylo à plume (porte-plume équipé d'une plume), le stylo à encre (stylo à plume à réservoir d'encre) et le stylo à bille.

Brevet № 96 (la demande a été effectuée en 1917, le brevet a été délivré en 1925) : pour augmenter la réserve d'encre sur une plume et réduire la vitesse de son dessèchement, on fixe sur la plume, au moyen d'une bague élastique, une fine plaque qui forme avec la rainure de la plume un tube conique permettant de retenir une plus grande quantité d'encre (fig. 2b).

Brevet № 3 157 (1925) : le porte-plume est présenté sous la forme d'un tube contenant deux plumes rentrantes utilisées alternativement.

Brevet № 3 837 (1925) : pour augmenter la quantité d'encre prélevée à la fois (et par conséquent réduire le temps de distraction), la plume est réalisée sous forme d'une plaque munie de rainures. Un réseau de rainures retient davantage d'encre grâce à un effet capillaire.

Brevet № 78 018 (1949) : pour retenir plus d'encre, une plume à écrire dispose de petites pattes perforées et repliées à l'intérieur, en forme de pétales (fig. 2c).

Brevet № 79 542 (1947) : pour mieux retenir l'encre, une pièce ondulée avec un relief transversal, pourvue de crochets écartés se fixe du côté concave de la plume (fig. 2d).

Brevet № 86 509 : la plume à réserve d'encre comprend un petit tube comportant une mèche de matériau poreux avec une extrémité terminée en pointe (fig. 2e).

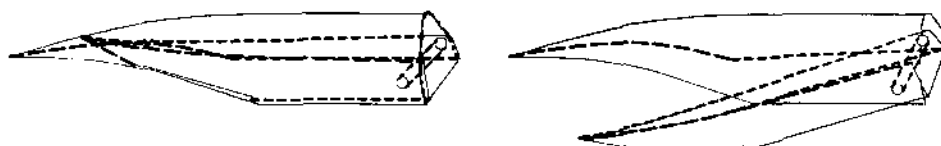
Cet ensemble d'innovations démontre une tendance manifeste à augmenter la fonction utile, autrement dit le confort et la durée d'écriture sans interruption. Outre l'organe de travail (la plume) et la transmission (le porte-plume), de nouveaux sous-systèmes ont fait leur apparition.

Brevet № 4 955 (1926) : est apparu porte-plume à réservoir d'encre.

Brevet № 5 974 (1927) : un porte-plume similaire à celui du brevet précédent est créé, mais cette fois-ci le réservoir est rempli d'un matériau poreux (une éponge).

Brevet № 8 176 (1927) : une plume tubulaire à réservoir d'encre se fermant par un capuchon est imaginée.

Brevet № 8 223 (1928) : une nouvelle plume apparaît : elle est constituée de deux parties, la partie inférieure est mobile et forme un réservoir d'encre (voir ci-dessous).



La plume laisse apparaître ses défauts, notamment l'usure de la pointe. Par conséquent, l'augmentation de la fonction utile exige une différenciation des propriétés de matériau.

Brevet № 12 642 (1927) : est créé un procédé permettant d'obtenir sur une plume en or une sphère d'iridosmine (pour des stylos à plume).

Tous ces brevets conduisaient à la naissance et puis au développement du stylo à encre :

Brevet № 24 268 (1929) : l'un des premiers stylos à encre est créé. Lorsqu'on appuie sur un bouton, une seringue extrait une goutte d'encre vers la plume et en reprenant sa position initiale sous l'action d'un ressort elle aspire une autre portion d'encre du réservoir.

Le stylo à encre, devenu un système technique assez complexe, évolue grâce au développement de ses sous-systèmes, et notamment de son réservoir ; on assiste alors à l'augmentation de la fonction utile du stylo.

Brevet № 66 214 : on invente un stylo à encre doté d'un réservoir dont l'extrémité supérieure est munie d'un bouchon réalisé en matériau capillaire-poreux. Ce bouchon permet une aspiration automatique de l'air extérieur et une alimentation uniforme de la plume.

Brevet № 74 633 : un stylo à encre dont le réservoir est un cylindre en accordéon allongeable apparaît.

Brevet № 198 956 : un stylo à encre, similaire à celui du brevet précédent, est amélioré en y intégrant un réservoir marqué de stries verticales.

Brevet № 906 354 : apparaît un stylo à encre à cartouche remplaçable.

Outre le réservoir, d'autres systèmes évoluent également.

Brevet № 91 953 : la pointe des stylos à encre liquide est pourvue d'un canal séparé en deux parties dont l'une sert à fournir l'air à l'intérieur du réservoir et l'autre à conduire l'encre à l'extrémité de la pointe.

Brevet № 94 422 : le brevet précédent est amélioré, pour augmenter le volume du canal et le débit d'encre, le canal d'air est intégré au filetage de la pointe.

On tente alors d'augmenter le nombre de fonctions en réunissant plusieurs systèmes techniques en un seul.

Brevet № 75 821 : le stylo à écriture multicolore, comportant plusieurs plumes distinctes rentrantes apparaît.

L'évolution de l'organe de travail (c'est-à-dire, la plume) décrit une nouvelle boucle. Il s'est transformé en un véritable sous-système constitué d'un ensemble d'éléments servant à écrire.

Brevet № 825 357 : l'origine de ce brevet est la résolution de problèmes posés par une plume constituée d'une plaque profilée avec un canal capillaire formé par une fente longitudinale qui servait à conduire l'encre. Ce système de conduite d'encre était peu fiable et complexe ; de plus, l'obtention d'une rigidité adaptée de la plume présentait des difficultés. En remplacement, il a été proposée une plaque avec un relief en forme de V dont la cavité intérieure formait un canal capillaire (fig. 2f).

Brevet № 867 687 : apparition d'un stylo à encre avec une plume dotée d'une fente de largeur réglable, comportant un moyeu fileté qu'on tourne. Ce système réduit la consommation d'encre lors de l'écriture.

Brevet № 941 225 : dans le système d'écriture d'un stylo à encre on insert une pièce en matériau capillaire-poreux afin d'éviter un flux d'encre irrégulier, des bavures et des projections d'encre.

Brevet № 1 076 321 : le brevet précédent est amélioré en introduisant un moyeu dont la section est variable.

La période actuelle se caractérise par deux tendances :

- *"l'intellectualisation" du stylo à encre*, marquée par une brusque complication de sa conception (introduction de blocs électroniques, tentative d'augmentation de la fonction utile grâce à une autorégulation précise).

Brevet № 1 214 495 : apparition du stylo à encre constitué d'un corps, d'un réservoir, d'une pointe à écrire avec un canal capillaire, d'un bloc électronique de commande servant à contrôler la formation de gouttes d'encre à la sortie. Pour accroître sa fiabilité, ce nouveau stylo contient un détecteur électrique de force, un transformateur de la tension en fréquence avec un amplificateur, une sortie de

transformateur liée à un transformateur piézo-électrique (tubulaire, polarisé en direction radiale) qui comporte un canal capillaire. La pression du doigt sur la plaque du détecteur en bas du stylo déclenche le fonctionnement du transformateur tubulaire. Le volume du capillaire diminue et son orifice extrait une goutte. Quand la force de pression croît, la fréquence d'émission de gouttes augmente de 0 jusqu'à 2 kHz et plus.

- L'apparition des premiers signes de réduction de ce système technique. Brevet № 1 250 478 : naissance de l'instrument à écrire de Kotov (fig. 2h) : il s'agit d'écrire en utilisant le mouvement de doigt (prototype du brevet français № 1 264 621).

Cependant un nouveau système technique est apparu durant le processus de perfectionnement du stylo à encre.

Les taches d'encre constituaient l'un des défauts principaux des stylos à encre. En 1938, un journaliste et éditeur hongrois, Lazlo Biro, a inventé un stylo à bille en s'inspirant d'une peinture typographique à séchage rapide. Après avoir obtenu le brevet, il s'est réfugié en Argentine peu avant le début de la guerre et, dans les années 40, y a commencé une production de masse de ces stylos. Un Anglais, Henri Martin, se trouvant à cette époque en Amérique du Sud, a vite apprécié l'importance d'un tel stylo à bille. La Deuxième Guerre mondiale battait son plein et les navigateurs de l'aviation avaient du mal à effectuer les calculs de navigation pendant le vol avec les moyens d'écriture dont ils disposaient. Des stylos à encre traditionnels n'étaient pas adaptés pour ces opérations car l'encre s'écoulait du stylo sous l'effet des différences de pression survenant durant les vols. Travailler avec un crayon n'était pas commode. Martin a acheté chez les frères Biro le droit de production des stylos à bille en Angleterre pour une somme considérable. Il a aménagé un hangar abandonné et a lancé la fabrication de ces stylos spécialement pour les forces aériennes de Sa Majesté. Peu de temps après, leur production a été également mise au point aux Etats-Unis. En une seule année, les navigateurs américains et britanniques ont reçu 30 mille stylos à bille.

Le 21 octobre 1945, un supermarché new-yorkais proposa des stylos à bille aux consommateurs ordinaires. Le succès fut phénoménal. Dix mille stylos ont été vendus en une seule journée en dépit du prix élevé de cette nouveauté équivalant au salaire de 8 heures de travail d'un ouvrier américain. En 1948, ce fut au tour de la fameuse compagnie Parker de se lancer dans la production de stylos à bille.

La véritable production de masse qui a mené à une rapide baisse de prix de cette nouveauté a été réalisée en premier par une société française Bic. Aujourd'hui, elle produit plus de 10 millions de stylos par jour.

La production de masse a conduit à perfectionner tous les sous-systèmes d'un stylo à bille, et plus particulièrement son organe de travail, la bille.

Brevet № 77 080 : dans le dispositif d'écriture des stylos à bille, la surface qui tient la bille est agrémentée de rainures pour mieux imprégner la bille d'encre.

Brevet № 1 234 228 : pour augmenter la fiabilité de fonctionnement et la qualité du trait dans un instrument à écrire composé d'une bille, d'un corps tubulaire et d'un réservoir à colorant (fig. 2i), la bille comporte des cavités sous forme de canaux radiaux. Une partie de ces canaux a un rétrécissement conique dirigé vers le centre de la bille. Le diamètre de leur orifice d'entrée est supérieur au diamètre des autres canaux. Lors de la rotation de la bille, les canaux vidés d'encre se remplissent d'air. En fonction du nombre de canaux ayant un rétrécissement conique et de leur disposition, on obtient un trait discontinu ou décoratif. Les billes contenues dans des pointes interchangeables peuvent être de diamètre différent.

L'utilisation de l'encre grasse au lieu d'une encre traditionnelle a révélé avec le temps des défauts spécifiques aux encres à viscosité élevée. Dans le fonds de brevets, il existe de nombreuses solutions visant à éviter la formation dans l'encre de bulles d'air et de bouchons. Les premiers stylos à bille étaient munis d'un piston dans le réservoir qui exerçait sur l'encre une pression (à l'aide d'un ressort ou d'une vis). Toutefois, pendant une pause, l'encre continuait à couler et il fallait interrompre l'action du ressort sur le piston. Cela compliquait la conception.

Brevet № 85 680 : pour simplifier la conception, le piston fonctionne ici uniquement sous l'action de la pression atmosphérique ; il s'agit d'un piston flottant.

Il y a eu des tentatives pour remplacer l'encre visqueuse par une encre liquide ordinaire.

Brevet № 80 986 : apparition d'un stylo à bille conçu pour une encre liquide ordinaire (et non pour des encres visqueuses spéciales). L'insuffisance d'encre visqueuse dans le pays est à l'origine de cette innovation qui constitue un progrès important car l'utilisation d'une encre liquide exige moins d'effort lors de l'écriture.

De nouveaux sous-systèmes sont apparus.

Brevet № 1 164 072 : apparaît un stylo comportant un réservoir muni d'un élément électrique chauffant en contact avec la surface sur laquelle on écrit. Ce stylo est particulier car pour rendre son fonctionnement plus fiable, le réservoir est composé de trois couches dont celle du milieu est conductrice et contient une source d'électricité.

Le prototype de cette innovation est le brevet américain 3 725 284 dans lequel l'échauffement du réservoir s'effectue de l'extérieur au moyen d'un système électrique. Le réservoir chauffe difficilement à basse température, la conception est peu fiable, la mise en marche se fait en tournant le capuchon.

Concernant les encres, on a élaboré une multitude de compositions d'encres visqueuses devant répondre à des exigences essentielles très contradictoires :

- dans un stylo à bille, l'encre ne doit pas se solidifier pendant un an minimum, puis, après avoir été déposée sur le papier, elle doit sécher dans un laps de temps compris entre 20 et 30 secondes ;
- l'encre doit être liquide pour mieux imprégner la bille et pour laisser une trace continue sur le papier, et, en même temps, elle doit être visqueuse pour ne pas couler du stylo lorsqu'il n'est pas utilisé ;
- l'encre, une fois déposée sur le papier, ne doit pas déteindre, changer de couleur ou se détériorer dans le temps.

Une des solutions réussies consiste à utiliser pour fabriquer l'encre des oligomères (un polymère composé d'un nombre restreint de monomères). Ils sont suffisamment liquides, mais ils se polymérisent au contact du papier et lient chimiquement les colorants très rapidement (*Chimie et vie*⁵, № 8, 1980, p. 47).

"L'intellectualisation" n'a pas non plus épargné le stylo à bille.

Brevet № 1 113 281 : pour élargir ses possibilités fonctionnelles, un stylo à bille contient un transformateur électromécanique, un détecteur de sensibilité tactile et une cellule

⁵ *Химия и жизнь*, № 8, 1980, с.47

tactile sous forme de matrice rectangulaire de Braille. La fréquence du transformateur électromécanique est de l'ordre de 210 à 220 Hz. Ce stylo permet l'écriture en Braille.

Comme tout système technique (et en premier lieu des systèmes techniques proches de l'homme), le stylo à bille s'adapte à la main, notamment le processus de dynamisation fait apparaître des conceptions flexibles.

Brevet № 1 202 902 : apparition du stylo à bille dont la pointe et le corps tubulaire en plastique peuvent se plier (en vissant et dévissant l'extrémité) de manière à former toujours un angle droit par rapport à la surface d'écriture (on obtiendra ainsi la meilleure position des billes selon la structure anatomique de la main).

Au niveau des encres, l'idée de substituer l'encre liquide à l'encre visqueuse n'est pas dû au hasard. Une bille tourne plus facilement dans une encre liquide, par conséquent la main se fatigue moins et l'écriture en devient plus légère et plus belle. Toutefois, le stylo à bille étant apparu comme une alternative satisfaisante aux stylos à encre, le retour à l'utilisation de l'encre liquide ne s'est pas produit.

A partir de l'ancien système technique (le stylo), un nouveau système a vu le jour et s'est rapidement développé : le feutre. Il est possible de trouver ses propriétés dans le système du crayon (on conserve le concept du crayon "chimique"), dans le stylo à plume (on conserve le matériau capillaire-poreux), dans le stylo à encre (on conserve le réservoir d'encre liquide) et dans le stylo à bille (on conserve le système corps – réservoir – pointe).

Citons seulement deux innovations caractéristiques.

Brevet № 294 305 (brevet de la Fédération de Russie, déposé par une société japonaise) : la pointe à écrire d'un stylo (ou d'un feutre) était composée d'un bâtonnet avec des rigoles longitudinales à l'extérieur. On a proposé dans ce brevet un bâtonnet avec un canal capillaire intérieur dont le diamètre peut aller de 0,02 à 0,04 mm muni de canaux radiaux et de rigoles circulaires transversales.

Brevet № 1 158 382 : ce brevet propose un appareil à écrire composé d'un corps, d'un réservoir à colorant, d'un embout avec un canal capillaire servant de sortie pour le colorant et d'un dispositif permettant d'éjecter le colorant par l'embout. Cet appareil améliore la qualité d'écriture et est plus commode à l'utilisation, car le dispositif à éjecter le colorant est réalisé sous la forme d'un condensateur métallique enroulé autour du réservoir. Une électrode du condensateur est liée par l'interrupteur à l'embout. Le condensateur se charge par une source extérieure. Sous l'action de forces électrostatiques, le colorant s'éjecte du canal capillaire, les particules du colorant chargées du même signe se repoussent. L'épaisseur du trait dépend de la tension de la charge.

L'apparition des calculateurs électroniques et des machines à écrire rapides a exigé d'inventer des procédés d'écriture automatique nouveaux dans leur principe. Une des premières innovations a été le brevet № 147 105 : la partie de travail d'une plume destinée à écrire sur un papier thermique (fig. 2i) est constituée d'une boucle de fil conducteur, protégée par de la céramique.

Une des dernières études de l'Institut de cybernétique de l'Académie des sciences d'Ukraine (*Progrès scientifique et technique : problèmes et solutions*⁶, № 3, 1988, p. 2) concerne un procédé d'écriture super-rapide. Le système technique écrit avec une encre ordinaire sur un papier ordinaire. Cependant dans ce "nouveau stylo" sont absents la bille, la plume, le réservoir, éléments qui devraient être en contact mécanique avec le papier. Le

⁶ НТР: проблемы и решения, № 3, 1988, с.2

mécanisme obtient l'effet de l'écriture en projetant les gouttes d'encre de quelques centaines de microns cubiques à une cadence pouvant aller jusqu'à 10 mille gouttes à la seconde. C'est pour cette raison que la vitesse d'écriture atteint 8 à 12 mètres par seconde. La productivité de l'appareil est ainsi multiplié par plusieurs dizaines ; de plus il est possible d'obtenir des images couleur.

2.3.4. Invention de l'imprimerie

L'invention de l'imprimerie (*Science et vie*⁷, 1972, № 5, p. 76-84) est une révolution dans la diffusion de connaissances et dans l'échange d'information.

L'idée qui a précédé l'invention de l'imprimerie date des temps immémoriaux. Avant les hiéroglyphes et l'écriture cunéiforme, les éleveurs marquaient le bétail (bœufs, chevaux) ; chacun reconnaissait ainsi sa propre marchandise. Il y avait une estampe pour les marchandises des négociants, une estampe du tsar, une estampe pour des milliers d'animaux et des milliers de marchandises... Pourquoi ne pas imprimer à l'aide d'un instrument identique un document important (une prière, un hymne, un manifeste) ?

Le plus ancien ouvrage écrit était un document fabriqué par estampillage sur argile, le fameux disque de Phaistos (III^e-II^e millénaire av. J.-C.) découvert en Crète. Malheureusement, personne n'a réussi à le déchiffrer. Une utilisation de masse des procédés de frappe et d'estampage est dictée par une nécessité, par un besoin social comme pour les Hôtels de la Monnaie. En Chine, pour copier des textes à l'époque où les copistes connaissaient seulement une partie des idéogrammes (3 à 5 mille parmi 40 mille) et où il fallait reproduire les signes avec exactitude, on réalisait les copies sur des planches. On gravait les idéogrammes, on déposait la peinture, on les couvrait avec une feuille de papier et on frottait avec une brosse douce (VI^e siècle après J.-C.). Gutenberg (au XV^e siècle) a fait une innovation très importante : au lieu des planches chinoises immobiles et invariables (pour chaque texte il fallait une nouvelle planche !), il a mis au point un ensemble de caractères mobiles pour pouvoir imprimer toute sorte de textes.

Avant Gutenberg, seulement deux procédés d'imprimerie étaient connus ; l'estampage (le disque de Phaistos) et la duplication à l'aide des planches gravées (Chine). Gutenberg les a réunis bien qu'il ne connaissait pas le procédé des planches. Une invention chinoise d'une grande importance – le papier – s'est rapidement répandue dans le monde entier à cause de son prix bas par rapport au parchemin et au papyrus. Le premier Evangile russe fait à Novgorod a nécessité un troupeau entier de vaches, de taureaux et de veaux. Le papyrus poussait uniquement sur les bords du Nil, alors qu'on fabriquait le papier de tissus, de branches et d'écorces...

Pour imprimer à l'aide des planches chinoises, on utilisait un papier buvard. La peinture traversait la feuille et ne nécessitait pas de graver les signes en miroir. Au Moyen Age, le lin était assez répandu en Europe. Intégré au papier il le rendait solide, élastique, brillant et blanc.

Le premier grand besoin d'imprimer est lié à la diffusion des jeux de cartes apportés en Europe de l'Orient par les croisés. Les jeux se sont répandus à une vitesse incroyable, avec eux l'escroquerie due à la fabrication manuelle de cartes (faciles à falsifier). Les tricheurs se sont multipliés aussi. Pour diminuer la fraude, on a commencé à graver les cartes sur des feuilles métalliques. De là, il fut facile de passer aux estampes au lieu des clichés en bois. En

⁷ С.Наровчатова, *Наука и жизнь*, № 5, 1972, с.76-84

outre ce procédé a attiré l'attention de l'Eglise qui l'a utilisé pour diffuser des images pieuses... Le texte sur les images s'écrivait à la main très brièvement (par exemple, "le meurtre de Caïn par Abel"). Les séries de gravures ont été reliées et sont devenues les premiers prototypes de livres. Les gravures les plus usitées, comme les calendriers, étaient imprimées avec des textes. Ensuite, fut imprimé et diffusé dans toutes les Universités européennes un manuel de grammaire du latin.

La principale cause du besoin croissant d'imprimer les livres était un brusque développement de l'instruction de la population vers le XV^e siècle. Le développement de la bourgeoisie, du commerce, des procédures judiciaires ont nécessité une grande quantité d'hommes instruits (compétents, capables de capitaliser rapidement une expérience antérieure et une information actuelle).

L'innovation de Gutenberg consistait à composer des lignes à l'aide de caractères mobiles gravés en miroir et à les estamper au moyen d'une presse sur du papier. Ce n'était pas difficile.

Les premiers caractères d'imprimerie étaient en bois (matériau peu solide). Pour cette raison, Gutenberg découvre une proportion de métaux fusibles et invente un alliage. Il fabrique un modèle de lettre en relief dans du fer et obtient le poinçon. Puis, en appuyant le poinçon sur un autre métal plus malléable (le cuivre), il obtient une image inverse enfoncée de cette lettre. C'est une matrice. En remplissant les matrices par un métal fusible (du plomb, de l'étain), on fabrique la quantité nécessaire de caractères. Ensuite, à l'aide d'une réglette munie de bords – un composteur, on assemble les caractères en texte. Les lignes se mettent sous une presse avec une feuille de papier préparée, puis il suffit d'un simple mouvement sur le manche de la presse pour que le texte imprimé soit prêt.

L'imprimerie s'est vite propagée dans toute l'Europe. En 1469, elle arrive à Venise. Souhaitant rendre le livre élégant et irréprochable, un propriétaire vénitien d'une typographie, Aldo, a inventé un dessin élégant et net : les caractères italiques. Il a également créé l'édition. Ainsi, d'énormes in-folio ont été réduits à des volumes de petite taille dont le prix était accessible à presque tout le monde. Dans son entreprise d'édition, Aldo organise un conseil rédactionnel constitué de 30 écrivains et savants en vue d'améliorer la qualité des livres. Le papier, la reliure, les caractères, les gravures se perfectionnent. Durant sa vie, Aldo a édité au total 153 livres.

Vers la fin du XV^e siècle, 10 millions de livres ont été imprimés dont 40 mille ont survécus jusqu'à nos jours.

L'imprimerie a donc été à l'origine d'une véritable révolution – la diffusion massive du résultat de ce progrès technique. Par conséquent, la vitesse de propagation des connaissances et des doctrines philosophiques a été brusquement augmentée.

2.3.5. Naissance du système de communication (réception – transmission d'information)

Naissance d'un besoin.

Le besoin de transmettre, de recevoir et d'analyser l'information est beaucoup plus ancien que l'homme. Il est né en même temps que la première vie, d'abord sous forme d'une simple représentation des changements dans le milieu extérieur. Puis à la suite de l'apparition et du développement des mécanismes adaptatifs, on a vu apparaître des détecteurs de changements de l'environnement qui se sont développés ensuite en un système complexe

d'organes visant à recueillir et à analyser l'information. Une longue évolution de la vie a pourvu l'homme de deux systèmes vitaux informatifs – l'ouïe et la vision.

Avec l'apparition des premiers rapports sociaux, les hommes de Neandertal ont éprouvé le besoin d'échanger des informations entre les membres du groupe. A cette époque, les gestes, les poses et les signaux sonores primitifs ne suffisaient plus à satisfaire ce besoin. Ainsi s'est développé le langage, canal sonore de transmission d'information, et bien plus tard, l'écriture et divers systèmes graphiques de signes (par exemple les dessins), canal optique de transmission d'information. Avec le déploiement des rapports sociaux et la complication de l'organisation de la société, les diverses formes de liens et les exigences d'efficacité de la transmission de l'information augmentaient. La transmission verbale peu systématique, la circulation aléatoire de rumeurs, les crieurs publics et autres – tous ces moyens qui fonctionnaient auparavant, ne pouvaient plus assurer une transmission précise et rapide des messages urgents, par exemple.

La fonction utile principale (FUP) du futur système devient alors la transmission de haute qualité, exacte, d'un volume considérable d'informations à des distances importantes avec une vitesse élevée.

Cette formulation de la FUP s'est appliquée au système de communication tout au long de son évolution dans le temps ; elle est opérationnelle de nos jours et elle le restera dans le futur. D'après cette définition de la FUP, il est possible de déterminer précisément l'appartenance d'un système technique au domaine de la communication.

Cette formulation ne signifie pas du tout que nous exigeons des anciens systèmes techniques les mêmes qualités que celles d'aujourd'hui. Sont prises en compte les exigences qui participaient à cette formulation à chaque étape concrète d'évolution. Et selon nos critères modernes ces exigences étaient des plus modestes. Cependant, cela ne veut pas dire pour autant qu'elles étaient faibles : la découverte de plusieurs phénomènes électriques avait plus d'importance que la découverte du laser.

Synthèse d'un nouveau système (qui n'est pas pour l'instant technique).

On a vu apparaître partout des messagers à pieds ou à cheval permettant de transmettre une information verbale ou écrite. Les systèmes de messagers ont trouvé leur utilité auprès des personnages importants de la hiérarchie sociale. Toutefois, la limite des forces physiques des hommes et des animaux réduisait considérablement la vitesse et la distance de transmission. Comment l'accélérer ? A ce moment-là, s'est révélée la première contradiction de l'évolution du système de communication, notamment le son de la voix se propage vite (330 m/s) mais pas loin (quelques dizaines de mètres), alors qu'un messager se déplace lentement (5 à 10 m/s) mais loin (plusieurs dizaines de kilomètres).

La première invention qui résolvait cette contradiction a été faite en Perse à l'époque du roi Cyrus le Grand en 530 av. J.-C. On plaçait des hommes à des distances égales et ils transmettaient les messages en chaîne. Jules César a décrit un système semblable chez les Gaulois. Ils étaient capables de transmettre les messages à 300 km en trois heures (à la vitesse environ 25 m/s et sur des centaines de kilomètres). Dans ce cas, on a utilisé le principe de réunion : plusieurs systèmes indépendants sont associés pour constituer un poly-système, et le qui existait déjà pour une distance limitée à quelques dizaines de mètres est maintenant utilisée pour des distances de 300 km.

Progressivement le système a révélé ses défauts : 1) le son s'affaiblissait considérablement avec la distance entre les chaînons et il fallait énormément d'hommes pour

une transmission à grande distance ; 2) la réception – transmission du message dans les chaînons se faisait lentement et comportait des erreurs.

En 1670, l'Anglais S. Morland a inventé le porte-voix, un tube à pavillon évasé en cône de fer-blanc, de verre, de laiton ou de cuivre dont la longueur pouvait atteindre 6 mètres. Le porte-voix concentrait le son, le réunissait en un faisceau unidirectionnel et permettait une audibilité jusqu'à 1,5 mille. Cette propriété était connue auparavant, et particulièrement utilisée pour les instruments musicaux à vent ("trompette de Jéricho").

Parallèlement à celui-ci se développait un autre système de transmission d'informations sans voix humaine : en Afrique, étaient utilisés des tambours et des tam-tams, en Grèce Antique, des feux, en Russie, la fumée des feux sur les collines et les tumulus. Toutefois, ces systèmes présentaient un défaut important : il n'y avait que deux signaux, "oui" et "non". Ce système n'a été conservé que dans les phares et les feux tricolores. Ensuite, en Grèce, est apparue la signalisation aux flambeaux. L'alphabet était transmis par des signes représentés à l'aide de ces flambeaux. Ce système a subsisté jusqu'au XX^e siècle au travers du code à fanions. Le système optique de transmission avait également ses défauts, notamment un volume peu important de messages pouvant être transmis, une faible vitesse de transmission car la composition du message prenait beaucoup de temps. Cependant, l'avantage principal, c'est-à-dire la vitesse incommensurablement plus élevée de propagation de la lumière, a favorisé le développement de ce système plutôt qu'un autre.

Le système de la communication optique a été perfectionné par un mécanicien français, Claude Chappe, qui a inventé en 1789 le télégraphe optique. Pour transmettre les messages d'une station de télégraphe à une autre, il utilisait un système de bras articulés (des lattes noires très visibles durant la journée). En les changeant de place, il était possible d'obtenir 200 figures différentes. Le code prenait 92 pages comportant chacune 92 mots. Le télégraphiste communiquait d'abord le numéro de la page et puis le numéro du mot. La première ligne de communication composée de 20 stations a relié en 1794 Paris et Lille. La vitesse de communication dans les deux sens était au début de 45 minutes ; mais avec le temps et la qualification croissante des télégraphistes elle a atteint 6 minutes. Napoléon même s'y est intéressé et bientôt ce système a trouvé une large utilisation.

La Russie a acheté ces systèmes à la compagnie "Chappe" en dépit du fait que I.P. Koulibin ait inventé en 1794 un système identique plus performant et plus pratique à utiliser et qu'il ait fait une démonstration du modèle de cette machine "informant à longue distance" la même année. Le premier réseau a relié Saint-Pétersbourg avec Schlisselburg et Cronstadt et en 1839 avec Varsovie (la ligne mesurait au total 1 200 km).

Le système de Chappe ne se distinguait guère des systèmes précédents et se caractérisait par les mêmes défauts : une dépendance vis à vis des conditions météorologiques (pluie, vent, brouillard), une faible vitesse de réception – transmission intermédiaire, une multitude d'erreurs lors de la transmission à grande distance.

Que fallait-il faire pour augmenter la FUP ?

Il fallait éliminer tous les chaînons intermédiaires et ne garder que le premier et le dernier, tout en conservant entre eux la vitesse de transmission égale à la vitesse de la lumière. En plus de cela, il fallait remplacer le milieu de transmission du signal, c'est-à-dire l'air, exposé à des phénomènes nuisibles aléatoires.

Ceci a conduit aux idées suivantes :

- "L'art téléphonique", projet de Kh. Volké, maître d'une pension de Saint-Pétersbourg, datant de 1795. Il s'agit d'une communication acoustique par des

tuyaux. Le projet de communication entre Pétersbourg et Cronstadt a été présenté à la cour de Catherine II.

- Le "Téléphonium" proposée par V. Soudre en France en 1828 : un mécanisme servant à transmettre des sons à distance (composé d'un marteau, d'une cloche et d'un tuyau métallique). Une proposition identique a été faite par Charles Wheatstone en Angleterre en 1831.
- Le "Téléphone à fils" de Robert Hooke en 1667. On tendait un fil entre deux boîtes. Le fil se fixait au fond de la boîte par un nœud. Lorsque le fil était tendu, le son était transmis d'une boîte à l'autre (le fond des boîtes servait de membrane). C'est un jeu d'enfant très connu.
- Le "Téléphone" d'E. Romersgaousen en Allemagne en 1838 : un appareil de communication fondé sur la propriété des rails de chemin de fer de transmettre le son à une longue distance.
- G.V. Rikhman (1711-1753), le premier électricien russe, collaborateur et ami de M.V. Lomonossov a inventé un appareil nommé "Réjouir les yeux". Il a intégré dans un circuit électrique une clochette et a remarqué que des étincelles jaillissaient entre la clochette et le martelet au moment où celui-ci la frappait. Il a eu ensuite l'idée de couper un fil de fer en plusieurs morceaux et de les relier par un fil de lin ; les étincelles se produisaient également dans ces intervalles. L'inventeur écrit : "Il est possible de courber et de fixer un circuit identique de manière à ce qu'il forme des lettres. D'où il est facile de comprendre qu'en générant de l'électricité, on peut montrer des lettres et des figures variées susceptibles de réjouir les yeux" (*La technique pour les jeunes*⁸, № 1, 1987, p. 42-43).
- Le télégraphe électrostatique de C. Morrisson en Ecosse en 1753 : une machine électrostatique crée une charge électrique qu'on envoie à l'aide d'un fil isolé à un point de destination. Pour transmettre un texte écrit, on utilise entre deux points autant de fils qu'il y a de lettres dans l'alphabet. A la station de réception, cette charge est perçue par une bille qui attire un bout de papier portant une lettre.

L'évolution des systèmes de communication s'est poursuivie :

- l'invention de Volt (1800) de la source d'électricité,
- le télégraphe électrique de Zemmering (1809) qui signalait la lettre transmise par la décomposition de l'eau dans un bain situé près de chacun des 35 fils,
- la découverte de l'électromagnétisme par Ørsted (1820),
- le télégraphe électromagnétique de P.L. Schilling (1828),
- les premiers télégraphes laissant une trace de B.S. Jacobi et S.F. Morse (1837),
- le télégraphe qui imprime des lettres de D. Hughes (1855),
- l'invention du téléphone, de la radio au XX^e siècle.

⁸ *Техника-молодежи*, № 1, 1987, с.42-43

2.3.6. Création et évolution de la machine à vapeur

La force de la vapeur était déjà connue à l'époque de l'Antiquité (Archimède, Héron d'Alexandrie, Léonard de Vinci). Il y a plus de deux mille ans, Héron a non seulement fabriqué des jouets mis en marche par la vapeur, mais il a également créé une machine à vapeur qui ouvrait les portes d'un temple. En Grèce antique, on n'utilisait pas de moteurs à vapeur tout simplement parce que le travail des esclaves était moins cher ; par conséquent, les Grecs n'avaient pas de raison pour perfectionner la technique.

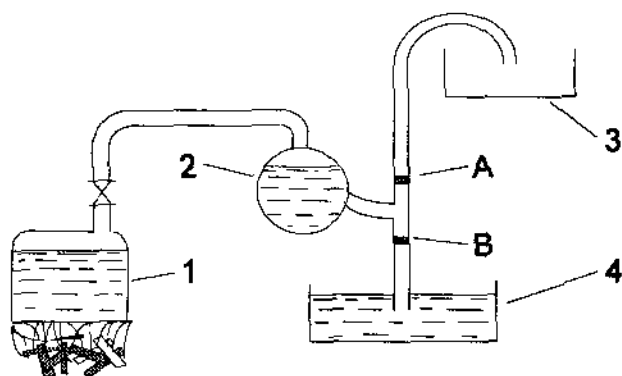
C'est seulement au XVII^e siècle (1615) que le Français Salomon de Caus a reproduit la machine de Héron : le couvercle d'un réservoir d'eau hermétiquement fermé comportait un tuyau. On plaçait le réservoir sur le feu, l'eau bouillait et la vapeur la montait dans le tuyau quelle que soit sa hauteur. Cette expérience démontrait concrètement la force de la vapeur.

Déjà, les premiers modèles des machines à vapeur comprenaient toutes les parties composant un système technique : une source d'énergie (le feu), un moteur (constitué d'un réservoir rempli d'eau, transformant l'énergie thermique en énergie mécanique par extension de vapeur), une transmission (le tuyau), un organe de travail (la vapeur), un objet (l'eau dans le tuyau), un organe de commande (l'homme à l'aide du feu).

En 1663, le marquis de Worcester a breveté et a mis en œuvre une machine à vapeur constituée d'une chaudière reliée par des tuyaux à deux réservoirs d'eau. Lors de l'ouverture d'un robinet sur un des tuyaux, la vapeur chassait l'eau du réservoir dans un conduit d'évacuation. A ce moment, on remplissait le deuxième réservoir d'eau. On fermait le robinet du premier tuyau, la pression dans la chaudière augmentait, on ouvrait le deuxième robinet et ainsi de suite.

L'organe de travail est devenu plus complexe : on a ajouté des réservoirs et des robinets permettant de le contrôler. Il a continué à évoluer, le schéma de travail de toutes les autres parties (source d'énergie – moteur – transmission) restant toujours le même. On voit apparaître des éléments propres au fonctionnement automatique (les soupapes par exemple) et un nouveau principe de traitement de l'objet : l'eau est aspirée au lieu d'être pompée.

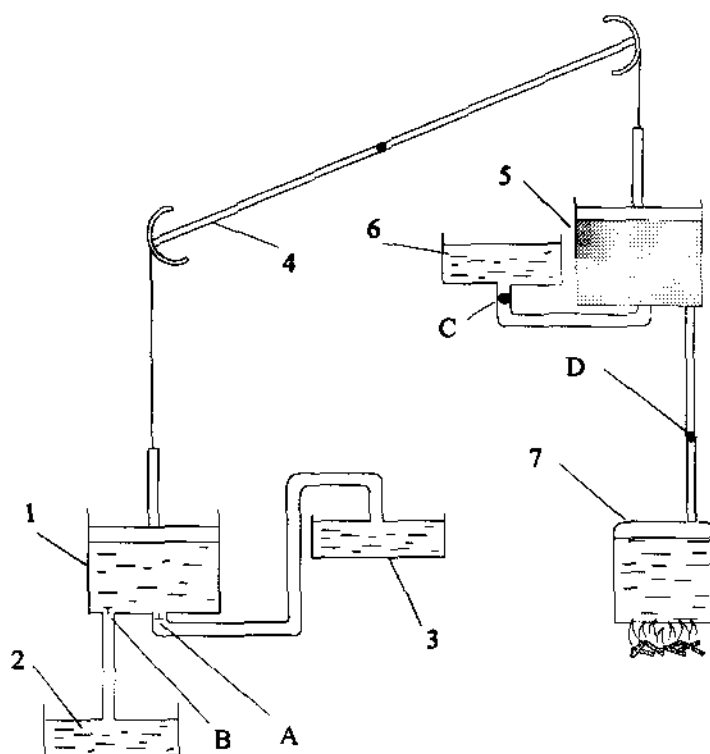
En 1698, un ingénieur anglais T. Savery a breveté une machine à vapeur destinée à pomper l'eau des mines. Elle se distinguait par l'adjonction de soupapes dans le conduit d'évacuation (fig. 3). On ouvrait le robinet de la chaudière (1), la vapeur chassait l'eau du réservoir d'eau (2), à ce moment, la soupape A s'ouvrait (la soupape B restant fermée) et l'eau arrivait dans le réservoir de réception d'eau (3). Puis le réservoir était refroidi par l'eau, ce qui entraînait une forte baisse de pression et créait le vide, ainsi l'eau de la source d'eau (4) était aspirée par la soupape B (la soupape A se fermant) et le cycle se répétait. Ce modèle avait un grand succès auprès de la cour britannique.



1 – chaudière, 2 – réservoir d'eau, 3 – réservoir de réception d'eau, 4 – source d'eau ; A, B – soupapes

Fig. 3. Pompe à vapeur destinée à élever l'eau de Thomas Savery

En 1705 en Angleterre, un forgeron et marchand de fer, Thomas Newcomen, a breveté une pompe à vapeur dans laquelle il a utilisé pour la première fois des cylindres avec des pistons (fig. 4).



1 – pompe, 2 – source d'eau, 3 – réservoir, 4 – balancier horizontal, 5 – cylindre principal, 6 – réservoir d'eau, 7 – chaudière ; A, B – soupapes, C, D – robinets

Fig. 4. Pompe à feu de Newcomen

Le piston de la pompe (1) descend sous son propre poids et déplace l'eau du cylindre dans le réservoir (3) (la soupape A est ouverte, la B est fermée). A ce moment, le cylindre principal (5) est rempli de vapeur en provenance de la chaudière (7) (le robinet D est ouvert, le C est fermé). Le balancier horizontal (4) descend à gauche et pousse le piston de la pompe (1). Puis, on refroidit le cylindre principal (5) de l'extérieur au moyen de l'eau (après une

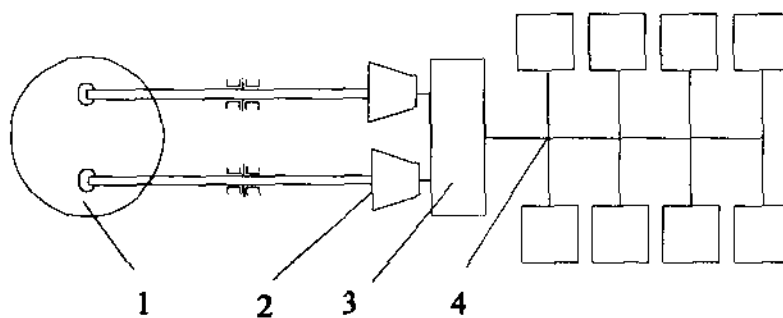
amélioration, on a commencé à injecter de l'eau directement dans le cylindre), la vapeur dans le cylindre principal (5) se condense et la pression tombe au-dessous de la pression atmosphérique. Le robinet C s'ouvre pour injecter de l'eau du réservoir (6). L'injection établit le vide dans le cylindre (5). Le piston, sous l'action de la pression atmosphérique, descend, le balancier (4) penche à droite, le piston de la pompe 1 monte, la soupape B s'ouvre, le cylindre de la pompe se remplit d'eau en provenance de la source d'eau (2). Le cycle se répète. C'est ce phénomène qui a donné à la machine le nom de "machine atmosphérique".

En 1770, environ 100 pompes de ce type étaient mises en service au nord de l'Angleterre, et en 1780, plus de 70 machines comme celles-ci fonctionnaient dans les mines d'étain de Cornouailles (au sud-ouest de l'Angleterre).

Lors du fonctionnement de la pompe à feu, il fallait ouvrir et fermer les robinets qui alimentaient le cylindre tantôt en vapeur (D), tantôt en eau (C). Un des garçons surveillant ces machines, G. Potter, est à l'initiative des premières machines automatiques : il a relié par une corde les robinets au balancier ; ceux-ci ont commencé à s'ouvrir et à se fermer tout seul.

L'élimination de l'homme des systèmes techniques a continué.

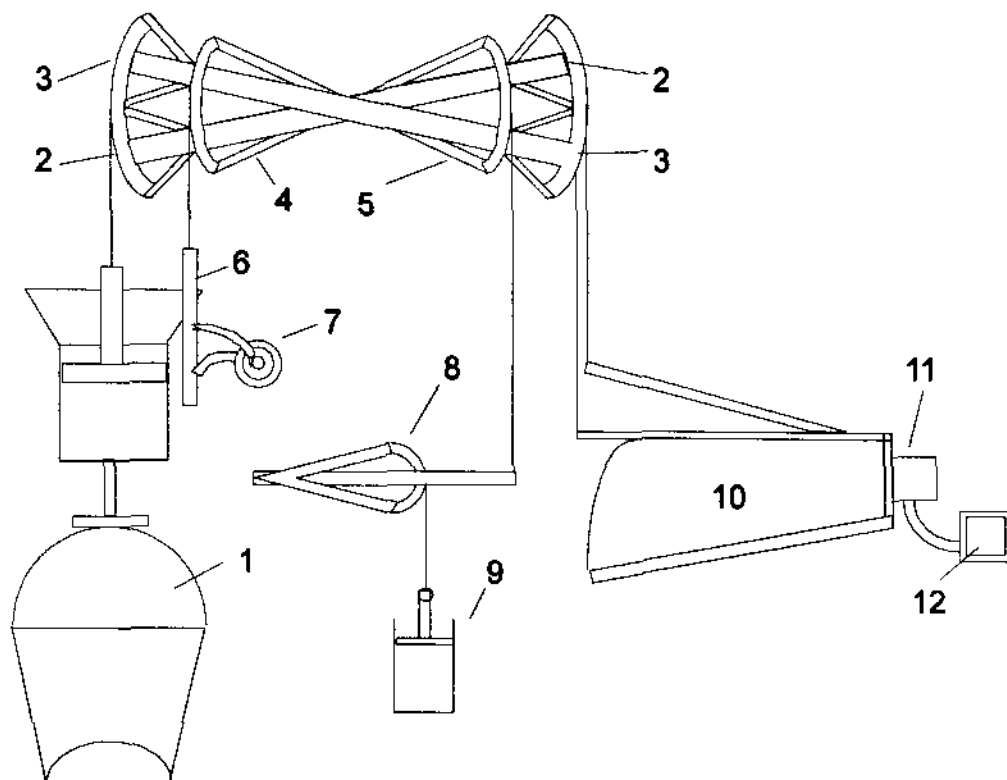
En 1763, après avoir étudié les travaux de Savery et de Newcomen, I.I. Polzounov a élaboré le projet de la première machine à vapeur universelle au monde, dont la puissance était de 1,8 chevaux (fig. 5).



1 – moteur à deux cylindres, 2 – soufflerie, 3 – accumulateur de pression, 4 – air comprimé conduit par une tuyauterie dans des hauts fourneaux.

Fig. 5. Machine à vapeur universelle de Polzounov

A la différence de la pompe à feu de Newcomen qui n'assurait pas un fonctionnement en continu et qui n'était, donc, utilisée que comme transmission des machines à simple effet (par exemple pour des pompes), la machine de Polzounov pouvait fonctionner constamment, autrement dit, elle était universelle. Polzounov a utilisé deux cylindres (c'est-à-dire un bi-système) dont les pistons fournissaient alternativement le travail sur l'arbre principal. Le principe d'agencement de plusieurs cylindres sur un seul arbre proposé pour la première fois par Polzounov a été ensuite largement utilisé (y compris dans le moteur à combustion interne). Polzounov a également conçu un dispositif automatique qui répartissait la vapeur et l'eau (positions 6 et 7 de la fig. 6).

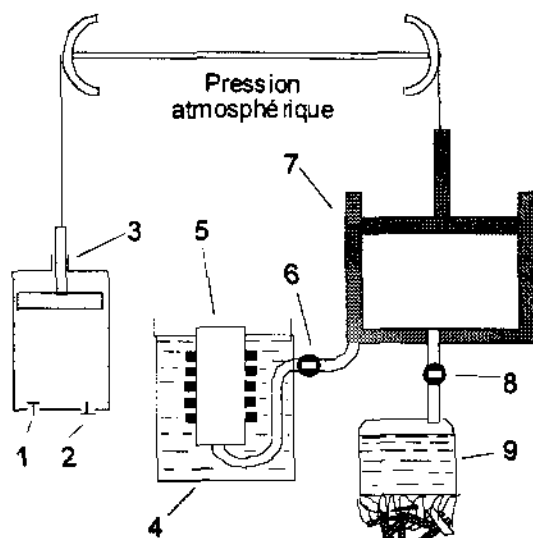


1 – cylindre, 2-3 – balanciers, 4-5 – petits semi-balanciers, 6-7 – mécanisme de répartition d'eau et de vapeur, 8 – semi-balancier, 9 – pompe, 10 – soufflerie, 11 – collecteur, 12 – accumulateur

Fig. 6. Schéma de la soufflerie de Polzounov

Une étape supplémentaire a été franchie par James Watt. Il a ouvert un atelier de réparation de divers appareils. Par ailleurs, il étudiait les propriétés de l'eau et de la vapeur. Au cours d'essais, il a déterminé la relation entre la pression et la température de la vapeur enrichie d'eau. En 1764, il a dû réparer un exemplaire de la pompe à feu de Newcomen. Après l'avoir soigneusement analysée, Watt a défini son défaut majeur : à cause de l'injection d'eau pour condenser la vapeur, le cylindre se refroidissait trop et lors de la nouvelle admission de vapeur, il fallait le réchauffer (ce qui conduisait à une dépense excessive de chaleur et de combustible). Watt a introduit deux améliorations très importantes qui ont considérablement augmenté le rendement de la machine à vapeur (fig. 7) :

- un condenseur de vapeur (5) : la vapeur se condensait non pas dans le cylindre mais dans le condenseur,
- une gaine d'isolation thermique (7) autour du cylindre.



1,2,6,8 – soupapes, 3 – pompe, 4 – réservoir d'eau, 5 – condenseur de vapeur, 7 – une gaine d'isolation thermique, 9 – chaudière

Fig. 7. Schéma de la machine à vapeur de J. Watt

La pompe à vapeur de Watt s'est avérée si efficace que dès 1790 toutes les pompes à feu de Newcomen dans les mines de Cornouailles (à l'exception d'une seule) ont été remplacées par celles de Watt (brevet de 1769).

Le domaine d'application des machines à vapeur s'étendit de plus en plus. Un grand nombre de demandes venaient de l'industrie textile, alors en plein développement. Il fallait des moteurs universels pour faire fonctionner l'outillage des manufactures.

Le brevet du moteur à vapeur universel a été délivré à Watt en 1781. Il a conçu et mis au point une machine à vapeur dotée de cylindres à double effet, d'un régulateur à boules et d'un indicateur mesurant le travail de la vapeur dans les cylindres de la machine. On a également commencé à utiliser le système bielle-manivelle connu depuis très longtemps.

En 20 ans de perfectionnement, Watt a éliminé la marche à vide : il a fermé le cylindre par un couvercle doté d'un joint d'étanchéité qui a permis de recevoir la vapeur alternativement par le bas et par le haut du piston – ce fut la première machine à double effet. La vapeur utilisée passait dans la une gaine d'isolation thermique et créait une enveloppe de protection. Dans le condenseur, la vapeur transmettait la chaleur à l'eau froide qui alimentait la chaudière. En vue de contrôler l'admission de vapeur, Watt a inventé un dispositif qui a remplacé le système des robinets : ce dispositif se déplaçait par le piston de la machine au moyen de tringles. Le régulateur à boules était indispensable pour déplacer la vanne à vapeur afin de maintenir constante la vitesse de rotation de la machine, malgré le changement de la charge et de la pression dans la chaudière.

2.3.7. La roue de chariot

Des systèmes techniques, perfectionnés par la sélection naturelle selon le processus d'essais-erreurs, atteignent une performance supérieure. Leurs éléments interagissent de manière optimale, c'est-à-dire en coïncidant parfaitement avec des lois réelles (physiques, chimiques, biologiques ou économiques) et sont programmés pour remplir de manière

optimale les fonctions utiles. Toutefois, les créateurs de ces systèmes techniques n'ont très souvent aucune notion de ces lois, de la conception optimale, de l'innovation.

D. Stert, auteur du livre "Atelier de réparation des roues", écrit : "A quoi servent le carrossage et la forme cambrée des roues ? A ma grande honte, je dois avouer que cette question m'a torturé durant plusieurs années, même après m'être persuadé des nombreux avantages de cette forme étrange et du fait que les roues sans carrossage ne tiendraient pas un mille. De toute évidence, le carrossage est nécessaire, mais pourquoi ? Pourquoi sans carrossage la roue se retourne-t-elle systématiquement vers l'extérieur comme un parapluie au vent ? Pourquoi sous un poids même vraiment très lourd, la roue se casse toujours de façon identique et jamais autrement ?"

Stert n'a découvert la réponse que beaucoup plus tard, en remarquant la trace sinueuse que laissaient les roues sur la route en oscillant à chaque pas du cheval. "Le chariot chargé en balançant avec les pas du cheval, donne des coups forts aux roues tantôt d'un côté, tantôt de l'autre. Après avoir reçu un coup, la roue droite le transmet tout de suite à la roue gauche et inversement. Il en va ainsi tout le temps, dans tout chariot. Les roues subissent non seulement le poids de la charge dirigé verticalement, mais aussi les efforts appliqués au centre" (tiré du livre : J.K. Johns. *Méthodes de conception*⁹. M. : Mir, 1986, p. 53-54).

Une telle solution technique, trouvée et améliorée au cours des siècles, difficilement comprise par un innovateur contemporain, est un exemple de système technique programmé pour réaliser au mieux les fonctions utiles principales.

Cependant, la voie d'innombrables succès et échecs au cours d'une recherche par le processus d'essais-erreurs peut durer plusieurs siècles et est trop lente et onéreuse.

2.3.8. Création d'un bateau à voile particulier : kotch de pomorié

L'homme préhistorique se fixait près des rivières, par conséquent, son premier besoin était de traverser la rivière. L'homme a découvert par hasard qu'un tronc d'arbre avait une bonne flottabilité. Après de longues observations, il a trouvé qu'un tronc creux flotte encore mieux. La constitution d'une cavité artificielle dans un tronc d'arbre a conduit à la première barque.

La recherche de vitesse, d'insubmersibilité, les observations de la nature, le travail ont contribué à l'invention d'une rame et puis d'une voile. Toutes les inventions ont été réalisées selon le processus d'essais-erreurs. On essayait et si le bateau coulait, on faisait autrement. Les innovations réussies étaient conservées, les systèmes se perfectionnaient. Chaque système technique mettait des centaines d'années à s'améliorer.

L'exemple d'un système perfectionné jusqu'à la limite est le kotch de pomorié – un bateau à voile en bois du nord de la Russie. Lorsqu'il était compressé par les glaces, il ne s'écrasait pas mais était tout simplement poussé vers le haut, car il possédait une forme spéciale.

Il est évident qu'avant cette innovation brillante, des milliers de bateaux ont été détruits, ont coulé et disparu. Seuls les bateaux dont la coque se rapprochait de la forme ovoïdale ont survécu. C'est cette forme-là que Nansen a utilisée plus tard pour son vaisseau "Fram" et Makarov pour son "Termak".

⁹ Дж.К.Джонс. *Методы проектирования*. М.: Мир, 1986, с.53 -54

Outre l'insubmersibilité, les ketchs se distinguaient par leur vitesse élevée. Ils parcouraient 70 à 80, voire 100 milles par jour, alors que les navires marchands anglais n'en parcouraient pas plus de 50, et les frégates hollandaises, 40. Malgré ces performances, Pierre le Grand a interdit la construction de ces navires "surannés" sous peine de punition. Toutefois, la tentative "directive" de freiner l'évolution de ce système technique a échoué et on a continué de les construire jusqu'au XX^e siècle.

Ainsi, le processus d'essais-erreurs permet-il d'aboutir à des résultats ? Oui, mais à quel prix ! Combien d'années, combien de vies faut-il y consacrer ! Selon des chercheurs américains, au cours des milliers d'années d'existence de la navigation, environ un million de bateaux ont disparu en mer.

3. SYSTEME TECHNIQUE : NOTION, DEFINITION, PROPRIETES¹⁰

3.1. Définition globale d'un système technique

Dans l'étude des processus d'évolution de la technique, il existe une approche systémique qui consiste à considérer tout objet technique comme un système d'éléments corrélatifs formant un tout unique. La *ligne d'évolution* est un ensemble de points cardinaux – des systèmes techniques totalement disparates (s'ils sont comparés uniquement entre eux) parmi lesquels se situe une multitude de solutions techniques intermédiaires – des systèmes techniques quelque peu modifiés par rapport à l'étape précédente d'évolution. Les systèmes semblent se métamorphoser, tout en évoluant lentement, en s'éloignant davantage du système initial, parfois jusqu'à être méconnaissables.

Des changements insignifiants s'accumulent et deviennent la cause de modifications qualitatives importantes. Pour connaître ces lois, il faut définir le système technique, les éléments qui le constituent, la façon dont apparaissent et fonctionnent des liens entre ses parties, l'impact sur le système de facteurs intérieurs et extérieurs, etc. Malgré une diversité infinie, des systèmes techniques possèdent en commun un certain nombre de propriétés, de caractéristiques et de particularités structurales, ce qui permet de les considérer comme un groupe unique d'objets.

Les caractéristiques principales des systèmes techniques sont les suivantes :

- ❑ *les systèmes se composent de parties*, d'éléments, c'est-à-dire qu'ils ont une structure ;
- ❑ *les systèmes sont conçus à des fins précises*, c'est-à-dire ils remplissent des fonctions utiles ;
- ❑ *les parties d'un système possèdent des liens entre elles*, elles sont liées d'une manière définie, organisées dans l'espace et le temps ;
- ❑ *chaque système dans son ensemble possède une propriété particulière* différente de la somme des propriétés de ses éléments constitutifs, sinon la conception d'un système intègre, fonctionnel et organisé perd son sens.

Démontrons-le à l'aide d'un exemple simplifié. Admettons qu'il faille dresser un portrait-robot d'un criminel. Un témoin a un objectif précis : constituer un système (photo-robot) en utilisant des parties distinctes (éléments). Le système est destiné à remplir une fonction utile. Naturellement, les parties d'un futur système ne se combinent pas n'importe comment, elles doivent se compléter. C'est pourquoi le choix d'éléments est un processus long, car il faut que chaque élément du système complète l'élément précédent et que tous ensemble ils accroissent la fonction utile du système. Pour revenir à notre exemple, il faut que les diverses parties augmentent la ressemblance du portrait avec l'original. C'est ainsi qu'à un moment donné, se produit un miracle – une réussite qualitative – la coïncidence d'une photo-robot avec le portrait du criminel. Dans ce cas, les éléments sont organisés dans l'espace d'une façon strictement définie (il est impossible de les déplacer), ils sont liés et ils apportent ensemble une nouvelle propriété. Même si le témoin identifie avec une précision absolue les yeux, le nez, etc. séparément sur les modèles, cette somme de "morceaux d'un visage" (dont

¹⁰ Revue par Sébastien Dubois et par Nathalie Gatiser, 2001-2002

chacun est correct !) ne formera pas le portrait désiré – ce sera tout au plus une somme de propriétés de ces éléments. Seuls les éléments assemblés d'une manière déterminée apportent la propriété principale du système (et justifient son existence). Ainsi, un ensemble de lettres (par exemple, S, I, A, P, N) apporte une nouvelle qualité (par exemple, SAPIN) uniquement si elles sont disposées d'une façon définie.

LE SYSTEME TECHNIQUE (ST) est un ensemble d'éléments interagissant dans un ordre bien défini, qui possède des propriétés autres que les propriétés des éléments séparés et qui est destiné à remplir des fonctions utiles définies.

Ainsi, un système technique possède quatre caractéristiques principales :

- *fonctionnalité,*
- *intégrité,*
- *organisation,*
- *propriété systémique.*

Si une seule de ces caractéristiques est absente, l'objet ne peut pas être considéré comme un système technique. Expliquons ces caractéristiques en détail.

3.2. Fonctionnalité

3.2.1. Objectif – fonction

Tout processus de travail, y compris le processus d'innovation, repose sur la notion d'objectif. Une innovation sans objectif n'existe pas. L'objectif des systèmes techniques est déterminé par l'homme. Les systèmes sont destinés à remplir une fonction utile. Déjà dans la Rome antique un ingénieur, Vitruve, énonçait : "La machine est un appareil en bois qui aide à lever des poids". L'objectif est un résultat imaginaire qu'on cherche à atteindre en satisfaisant le besoin. Ainsi, la synthèse des ST est un processus orienté vers un but précis. N'importe quel état actuel d'un ST peut avoir dans l'avenir de nombreuses conséquences dont quasiment la majorité fait partie des processus entropiques. L'homme choisit l'objectif et augmente ainsi la probabilité d'événements dont il a besoin. Le choix d'un objectif approprié et précis est la résultante de l'expérience acquise au cours de la lutte contre les processus entropiques lors de l'évolution (la nature vieillit les systèmes et cause la destruction des systèmes techniques).

3.2.2. Besoin – fonction

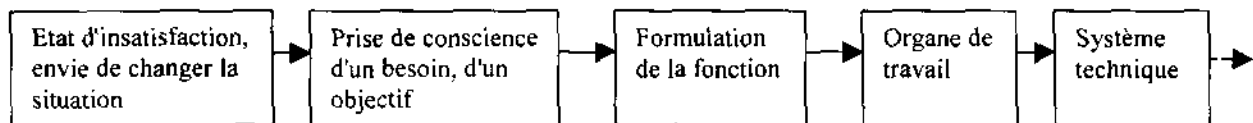
L'apparition d'un objectif résulte de la prise de conscience d'un besoin. L'homme se distingue des autres êtres vivants par ses prétentions exagérées, nettement plus élevées que les possibilités des organes naturels. Le besoin (c'est-à-dire la formulation d'un problème) est ce qu'il faut obtenir et la fonction est la réalisation du besoin dans un ST.

Il est possible de satisfaire un besoin au moyen de plusieurs fonctions. Par exemple, un besoin d'échanger des produits peut être satisfait par un échange naturel (le troc), un échange équivalent (on utilise un objet comme monnaie d'échange, des coquillages par exemple) ou un échange contre monnaie (utilisation de métal comme l'or ou l'argent). De même, la fonction choisie peut être réalisée au moyen de plusieurs objets réels. Par exemple, la monnaie d'échange peut se présenter sous forme de cuivre, d'or, de papier, des dents de requin, etc. Et enfin, tout objet réel peut être obtenu par plusieurs voies ou bien son

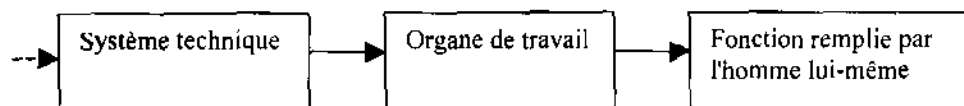
fonctionnement peut se baser sur différents principes physiques. Par exemple, il est possible d'obtenir le papier pour la monnaie de diverses façons : effectuer le dessin en peinture, sous forme d'un hologramme, etc. Ainsi, les systèmes techniques peuvent suivre en principe de multiples voies d'évolution. Cependant, l'homme choisit une seule voie de réalisation d'un besoin en suivant un critère unique, *un minimum de Masse, Dimensions, Energie (MDE)*. Et, bien que cette voie soit souvent tortueuse et possède un grand nombre de boucles et de ramifications qui peuvent mener dans une impasse, il ne peut en être autrement car l'humanité a toujours été limitée par les ressources disponibles.

3.2.3. Porteur de la fonction

La naissance de besoins, la prise de conscience d'un objectif et la formulation d'une fonction sont des processus qui sont intrinsèques à l'homme. Toutefois, une fonction réelle est une action exercée sur un objet ou un service rendu à l'homme. En d'autres termes, il manque un chaînon intermédiaire – un organe de travail que l'on qualifie de "porteur de la fonction". **L'organe de travail est la seule partie du système technique qui est utile à l'homme par ses fonctions.** Toutes les autres parties du système sont auxiliaires. Les premiers ST ont été conçus justement comme des organes de travail (en remplacement et en complément des organes de corps). Seulement plus tard, d'autres parties, des sous-systèmes, des systèmes auxiliaires sont apparus autour de l'organe de travail pour accroître la fonction principale. Il est possible de présenter ce processus comme suit :



Imaginons (spéculativement pour l'instant) la possibilité d'une marche arrière comme suite du processus ci-dessus.



La première partie du processus est la croissance de la technique, la deuxième est la réduction. Cela signifie que l'homme est intéressé par la fonction et non pas par le porteur de la fonction.

Pour simplifier le passage d'une fonction vers le porteur de la fonction (c'est-à-dire vers l'organe de travail d'un futur ST), il faut décrire la fonction avec une grande précision. Plus la description est détaillée, plus le nombre de contraintes imposées à la conception de l'organe de travail est élevé, plus la gamme des moyens de sa réalisation est restreinte. Ceci conduit à une meilleure définition du ST et de sa structure. Les lois d'évolution des organes de travail dans d'un ST restreignent énormément le nombre de variantes.

3.2.4. Définition de la fonction

Fonctionner veut dire changer de propriétés, de caractéristiques et de qualités d'un système dans l'espace et le temps. **La fonction est une aptitude d'un ST à manifester sa propriété (qualité, utilité) dans des conditions définies et à donner à l'objet la forme ou la dimension requise.** Pour définir la fonction, il faut répondre à une question : "Qu'est-ce que

fait ce ST ?" (pour des ST existants), "Qu'est-ce que doit faire le ST ?" (pour les ST en cours de synthèse).

3.2.5. Hiérarchie des fonctions

Tout ST est capable de remplir plusieurs fonctions. Une seule parmi elles est une fonction de travail qui justifie l'existence du ST. Toutes les autres fonctions sont auxiliaires, concomitantes, facilitant la réalisation de la fonction principale. La définition de la fonction utile principale (FUP) s'avère parfois difficile. Cela s'explique par la multiplicité des exigences émises vis-à-vis du système par les systèmes des niveaux hiérarchiques supérieur et inférieur, ainsi que par des systèmes voisins (d'un même niveau hiérarchique), des systèmes extérieurs (avec lesquels le système est en interaction directe) et d'autres systèmes (avec lesquels le système est en interaction de façon totalement fortuite). D'où l'infinité apparente de définitions de FUP (il est impossible en principe de définir toutes les propriétés et tous les liens).

Exemple. Hiérarchie des fonctions d'une brique.

FUP-1 d'une brique à part entière : conserver sa forme, ne pas se casser, avoir un poids précis, une structure, une solidité. Exigences de la part des systèmes voisins (des autres briques et du mortier) : avoir des faces rectangulaires, se lier avec le mortier.

FUP-2 d'un mur : supporter son poids, être vertical, ne pas se déformer avec le changement de la température, de l'humidité, des charges, délimiter quelque chose, supporter la charge de quelque chose. Une brique doit satisfaire une partie d'exigences de la FUP-2.

FUP-3 d'un bâtiment : créer des conditions particulières pour le milieu intérieur, protéger contre les perturbations atmosphériques, avoir une certaine esthétique. Une brique doit également satisfaire une partie de ces exigences.

FUP-4 d'une ville : avoir une image architecturale définie, des spécificités climatiques, un côté traditionnel, etc.

De plus, les exigences envers une brique croissent constamment : elle ne doit pas absorber l'humidité du sol, elle doit servir de bon isolant thermique et sonore, laisser passer des ondes radioélectriques, etc.

La FUP d'un système peut être réduite à la satisfaction des exigences du premier système d'un niveau supérieur. Toutes les autres exigences sont de moins en moins influentes sur le système donné, au fur et à mesure qu'elles s'éloignent de leur niveau hiérarchique initial. Les exigences des super-, et des sous-systèmes peuvent être remplies par d'autres substances et systèmes, pas forcément par le système donné. Par exemple, il est possible de réaliser une brique plus résistante en ajoutant divers additifs dans le mélange initial et plus esthétique en carrelant le mur. Pour la FUP d'une brique, satisfaire les "exigences" d'un mur ne sert à rien.

Autrement dit, la FUP d'un élément est définie par le système auquel il appartient. La même brique peut faire partie d'une multitude d'autres systèmes dans lesquels sa FUP pourra être absolument différente, voire opposée à la FUP présentée ci-dessus.

Exemple. Définir la FUP d'un chauffage électrique.

- ❑ A quoi sert un chauffage électrique ? – à chauffer l'air dans une maison.
- ❑ A quoi sert de chauffer l'air dans une maison ? – à maintenir la température constante.

- Pourquoi la température ne doit-elle pas baisser ? – pour assurer le confort de l'homme.
- A quoi sert le confort pour l'homme ? – à diminuer le risque de tomber malade, etc.

Cette hiérarchie d'objectifs est dirigée vers le haut – vers le super-système. La fonction-objectif citée à chaque étape peut également être obtenue par un autre ST. Le chauffage électrique fait partie d'un système : "maison – air – homme – chauffage" et satisfait ses "exigences".

Il est possible de descendre cette hiérarchie :

- Qu'est-ce qui chauffe l'air ? – un champ thermique.
- Qu'est-ce qui crée un champ thermique ? – une spirale chauffante.
- Qu'est-ce qui agit sur la spirale pour obtenir de la chaleur ? – le courant électrique.
- Qu'est-ce qui amène le courant jusqu'à la spirale ? – des fils électriques, etc.

Donc, le super-système "exige" que le chauffage chauffe l'air. Et que fait le chauffage et en particulier la spirale qui est son organe de travail ? – il dégage de la chaleur et crée un champ thermique. Ceci constitue donc la FUP d'un chauffage : le dégagement de chaleur comme la "réponse" à "l'exigence" du super-système. Dans ce cas, le champ thermique est le "produit" du système technique "chauffage". La FUP du super-système est d'assurer le confort de l'homme.

3.3. Intégrité

3.3.1. Définition de la structure

L'ensemble des éléments et des propriétés est un attribut indissociable d'un système. La réunion de ces éléments en un tout unique est indispensable pour obtenir une fonction utile, autrement dit, pour atteindre un but.

La définition d'une fonction (c'est-à-dire d'un objectif) est relative, elle dépend dans une certaine mesure de l'homme. La structure, qui est l'une des propriétés les plus objectives d'un système, au contraire, ne dépend que du type et de la composition matérielle des éléments utilisés dans un ST, ainsi que des lois universelles du monde qui déterminent les moyens d'agencement des éléments, les types de liens entre eux et les régimes de leur fonctionnement dans une structure. Dans ce sens, la structure est une manière d'agencer des éléments dans un système. Déterminer la structure signifie programmer un système, déterminer son comportement en vue d'obtenir comme résultat une fonction utile. La fonction requise et le principe physique opté pour sa réalisation déterminent aussi la structure.

La structure est un ensemble d'éléments et de liens entre eux définis par un principe physique de réalisation de la fonction utile requise.

La structure ne change pas en cours de fonctionnement, c'est-à-dire pendant le changement d'état, de comportement d'un ST, pendant les opérations et toute autre action.

L'important dans une structure, ce sont ses éléments et ses liens ainsi que leur invariabilité dans le temps.

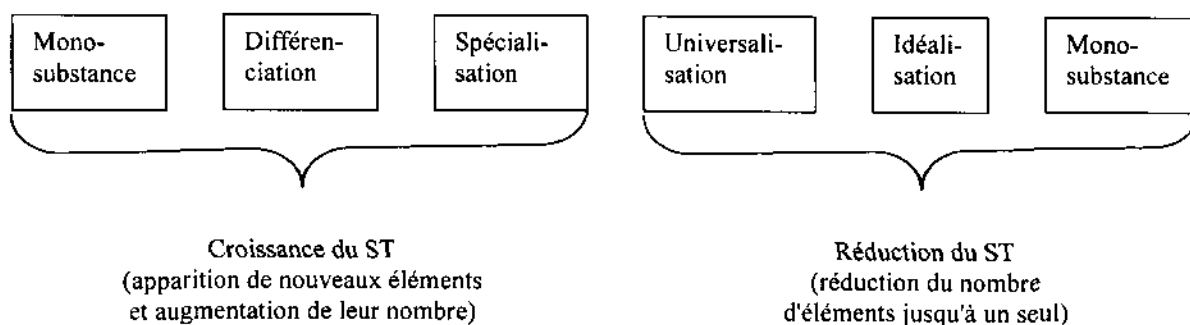
3.3.2. Élément de la structure

Un élément, un système sont des notions relatives. Tout système peut devenir élément d'un système d'un rang plus élevé. Pareillement, tout élément peut être représenté comme un système d'éléments d'un niveau inférieur. Par exemple, un boulon (vis + écrou) est un élément d'un moteur qui, à son tour, est une unité de structure (c'est-à-dire un élément) dans le système "automobile", etc. Une vis se compose de parties, par exemple des corps géométriques, tels que la tête, la tige cylindrique, le filet, l'extrémité. Un boulon est réalisé en acier, système composée d'éléments de fer, de carbone et de liant, eux-mêmes composés d'associations moléculaires (grains, cristaux), le niveau encore plus bas est constitué d'atomes et de particules élémentaires.

L'élément est une partie relativement complète d'un système ayant certaines propriétés intrinsèques, ne disparaissant pas lorsqu'il se sépare du système. Cependant les propriétés d'un élément, considéré dans le système, ne sont pas équivalentes aux propriétés de cet élément pris séparément.

Il est possible que la somme de propriétés d'un élément dans un système soit supérieure ou inférieure à la somme de ses propriétés en dehors du système. En d'autres termes, un élément peut acquérir de nouvelles propriétés ou, et c'est ce qui se produit dans la plupart des cas, certaines propriétés d'un élément constituant le système peuvent se neutraliser et disparaître. En fonction de l'importance de cette partie, on parle du degré de perte d'individualité d'un élément. Le système possède une partie des propriétés des éléments qui le constituent, mais aucun élément ne possède la propriété d'un système entier (effet ou propriété systémique). A quel moment le sable cesse-t-il d'être sable ? Au niveau juste supérieur (sable – pierre – roche) ou juste inférieur (sable – poussière – molécules – atomes – ...). Ici les propriétés de sable sont partiellement conservées lorsque l'on monte les niveaux hiérarchiques et elles disparaissent aussitôt lorsqu'on les descend.

L'élément est une unité minimale d'un système capable de réaliser une fonction élémentaire. Tous les systèmes techniques sont issus d'un élément unique destiné à remplir une seule fonction élémentaire. L'accroissement de la FUP engendre le renforcement de certaines propriétés de l'élément. Ensuite intervient une différenciation de l'élément, c'est-à-dire sa division en zones ayant des propriétés différentes. Des éléments avec une mono-structure (une pierre, un bâton) commencent à être constitués de plusieurs éléments. Ainsi, durant la transformation d'un outil préhistorique en silex en un couteau sont apparues une zone de travail et un manche. Ensuite le renforcement de propriétés spécifiques de chaque zone a nécessité d'utiliser des matériaux différents (des instruments composés). L'organe de travail a donné naissance à une Transmission (Tr) qui a évolué par la suite. Puis ils se sont complétés par un élément Moteur (Mtr), un Organe de Commande (OC) et une Source d'Energie (SE). Le système s'accroît avec la complication de ses éléments, il intègre des sous-systèmes auxiliaires et devient hautement spécialisé. Toutefois, à un moment donné de l'évolution, le système commence à assimiler les fonctions des systèmes voisins sans augmenter le nombre de ses éléments. Il devient de plus en plus universel avec un nombre invariable d'éléments qui décroît ensuite.

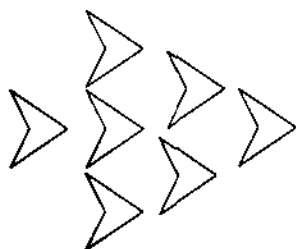


3.3.3. Types de structures

Voici quelques structures caractéristiques des systèmes techniques :

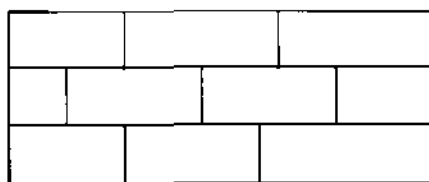
1) Corpusculaire

La structure corpusculaire se compose d'éléments identiques ayant des liens faibles. La disparition d'une partie des éléments n'a pratiquement pas d'impact sur la fonction du système. Exemples : escadre de navires, filtre de sable.



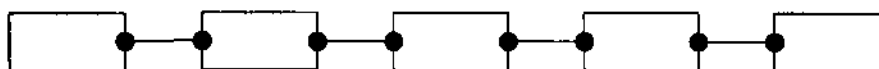
2) Imbriquée

La structure imbriquée est constituée d'éléments identiques avec des liens rigides. Exemples : mur, arc, pont.



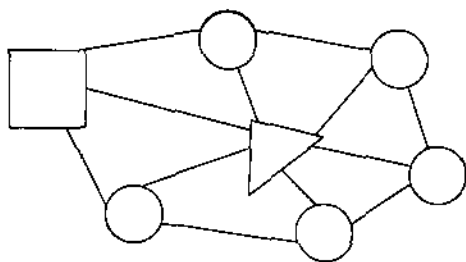
3) En chaîne

La structure en chaîne est constituée d'éléments du même type liés entre eux au moyen de charnières. Exemples : chenille, train.



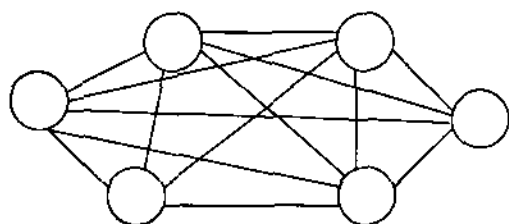
4) En réseau

La structure en réseau est composée d'éléments disparates liés entre eux directement, via d'autres éléments ou via un élément central (structure en forme d'étoile). Exemples : réseau téléphonique, bibliothèque, réseau de centrales thermiques.



5) Multi-lien

La structure multi-lien comprend une multitude de liens croisés dans un modèle en réseau.



6) Hiérarchique

La structure hiérarchique se compose de différents éléments dont chacun est constitutif d'un système situé à un niveau plus élevé. Chaque élément est lié "horizontalement" avec les éléments du même niveau et "verticalement" avec les éléments de niveaux différents. Exemples : machine-outil, automobile, fusil.

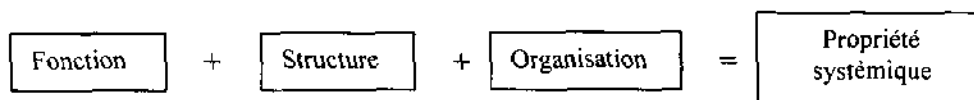
Selon le type d'évolution dans le temps, les structures peuvent être :

1. Croissantes. Avec le temps, lorsque la FUP augmente, la quantité d'éléments croît également.
2. Décroissantes. Avec le temps, lorsque la FUP croît ou reste constante, la quantité d'éléments diminue.
3. Réductibles. A un moment donné, la quantité d'éléments, de même que la FUP, commence à diminuer.
4. Dégradantes. La FUP ainsi que les liens, la puissance et l'efficacité diminuent.

3.3.4. Principes de construction d'une structure

Le repère principal dans le processus de synthèse d'un système est l'obtention d'une nouvelle propriété systémique. Le choix d'une structure, c'est-à-dire sa construction est une étape importante de ce processus.

Synthèse d'un système :



Pour un seul système, il est possible de sélectionner plusieurs structures différentes en fonction du principe physique choisi, en vue de réaliser la FUP. Le choix d'un principe physique doit reposer sur la minimisation des MDE (masse, dimensions, énergie) tout en conservant l'efficacité.

Le choix de la structure est la base de la synthèse d'un système.

Voilà quelques principes de construction de la structure :

- principe de fonctionnalité ;
- principe de causalité ;
- principe d'intégrité des parties ;
- principe de complémentarité.

Le principe de fonctionnalité exprime la prédominance de la fonction sur la structure. Le choix d'un principe de fonctionnement définit également la structure, c'est pourquoi il faut les considérer conjointement.

Fonction \longrightarrow Principe de fonctionnement \longrightarrow Structure

Le principe de fonctionnement (c'est-à-dire la structure du système) est un reflet de la fonction-objectif. Selon le principe de fonctionnement choisi, il faut établir un schéma fonctionnel (il est possible qu'il soit sous forme de *vépole*¹¹).

Un schéma de fonctions se construit suivant le *principe de causalité*, car tout ST se soumet à ce principe. Le fonctionnement d'un ST est une suite d'actions-événements.

Chaque événement dans un ST est provoqué par une ou plusieurs causes et est lui-même responsable des événements ultérieurs. Tout commence par la cause, c'est pourquoi le point crucial est d'assurer l'émergence de cette cause. Pour cela, il faut répondre aux quelques conditions suivantes :

- assurer des conditions extérieures qui ne gênent pas la manifestation de l'action ;
- assurer des conditions intérieures qui permettent la réalisation d'un événement ou d'une action ;
- assurer une raison, une impulsion, une "étincelle" extérieures pour déclencher une action.

Le plus important dans le choix d'un principe de fonctionnement consiste à réaliser au mieux le principe de causalité.

Un moyen fiable est de dresser une suite d'actions allant de l'événement final vers l'événement initial. L'événement final est une action obtenue par l'organe de travail, c'est-à-dire la réalisation d'une fonction du ST.

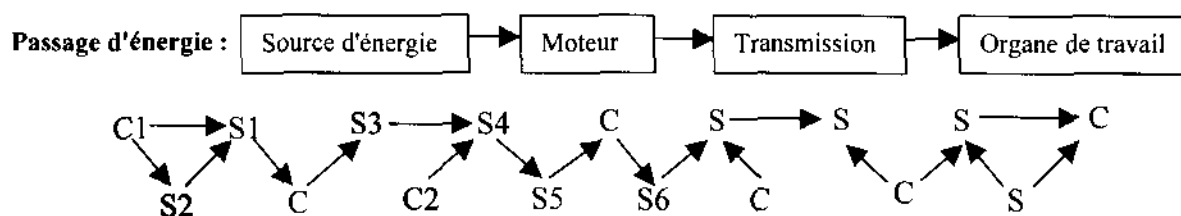
L'exigence principale envers la structure est un minimum de pertes d'énergie et un fonctionnement correct de l'action (en excluant les erreurs), autrement dit, une conductibilité énergétique élevée et une fiabilité de l'enchaînement cause-effet.

Lors de la résolution de problèmes d'innovation, après la formulation d'une Contradiction Physique (CP) le passage à un principe physique présente des difficultés. Dans ce cas le principe de causalité peut aider. Une CP est une commande, une action finale, à partir de laquelle il faut dresser une suite de causes et d'effets jusqu'à un effet physique.

¹¹ [NDT] : *Vépole* – ST minimal constitué d'un objet et d'un instrument (des éléments matériels) dont l'interaction est assurée par un flux d'énergie (un champ). C'est une combinaison de deux premières syllabes des mots "vestchestvo" (substance) et "polé" (champ).

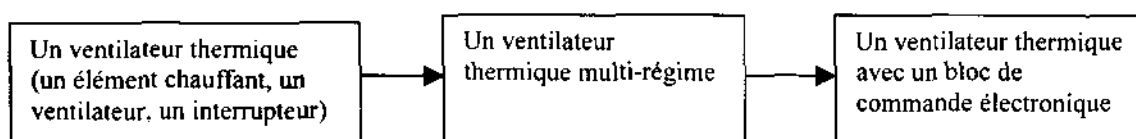
Lorsqu'on construit un schéma de fonctions pour la première fois il est possible de prendre comme base le principe d'intégralité des parties (loi d'intégralité des parties du système). Voilà un éventuel enchaînement d'étapes :

1. On formule la FUP.
2. On définit le principe physique de l'action que l'organe de travail exerce sur l'objet.
3. On sélectionne et synthétise un OT (organe de travail).
4. L'organe de travail se complète par une transmission, un moteur, une source d'énergie et un organe de commande.
5. On construit un schéma de fonctions dans sa première approche :



6. On détermine des défauts et des failles possibles dans le schéma. On élabore des schémas plus détaillés en tenant compte de la hiérarchie des sous-systèmes. On complète des systèmes qui remplissent insuffisamment leurs fonctions à l'aide de nouveaux éléments.

Par exemple :



C'est une voie ordinaire de croissance d'un ST : augmentation de la FUP par ajout de nouveaux sous-systèmes avec des fonctions utiles.

Une augmentation de la FUP est possible grâce à la réduction de liens et d'effets nuisibles dans des sous-systèmes, et ce sans les compliquer.

La voie la plus radicale est l'idéalisation d'un ST.

Le principe de complémentarité consiste à assembler des éléments d'une façon particulière lors de leur intégration dans le système. Les éléments doivent avoir non seulement des formes et des propriétés cohérentes (afin de pouvoir être assemblées), mais aussi se compléter, se renforcer, additionner des propriétés utiles et neutraliser des propriétés néfastes. C'est le mécanisme principal d'apparition d'une propriété systémique.

3.3.5. Forme

La forme est une manifestation apparente de la structure d'un ST, alors que la structure est le contenu de la forme. Ces deux notions sont étroitement liées. Dans un système technique l'une d'elles peut dominer et dicter les conditions de réalisation de l'autre (par exemple, la forme de l'aile d'un avion détermine sa structure). La logique de la structure se

définit généralement par des principes intérieurs et des fonctions d'un ST. Dans la plupart des cas la forme est fonction des exigences d'un super-système.

Des exigences essentielles envers la forme :

- fonctionnelles (forme de filetage) ;
- ergonomiques (manche d'un instrument, siège d'un conducteur) ;
- technologiques (simplicité et commodité de fabrication, d'usinage, de transport) ;
- d'exploitation (durée de vie, résistance mécanique, stabilité, commodité de réparation) ;
- esthétiques (design, beauté).

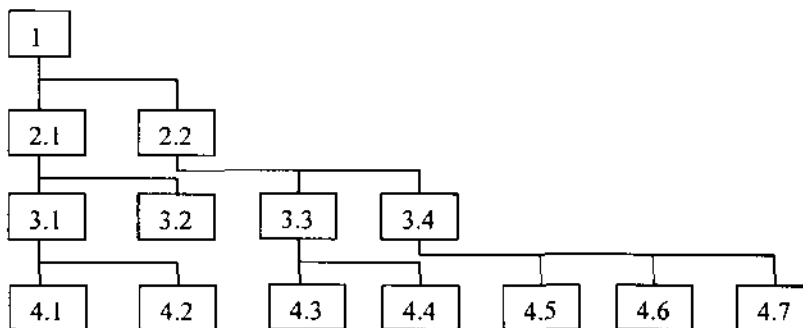
3.3.6. Structure hiérarchique des systèmes

Le principe d'organisation hiérarchique de structure n'est possible que dans des systèmes composés de plusieurs niveaux (c'est une classe importante de systèmes techniques modernes). Il consiste à ordonner du haut vers le bas des interactions entre les niveaux. Chaque niveau joue le rôle de supérieur pour les niveaux inférieurs et de subordonné par rapport à un niveau supérieur. Par ailleurs, chaque niveau se spécialise dans la réalisation d'une seule fonction (FUP de niveau). Il n'existe pas de hiérarchies absolument inflexibles. Une partie des systèmes des niveaux inférieurs est plus ou moins autonome par rapport aux niveaux supérieurs. Dans le cadre d'un niveau, les éléments sont égaux, se complètent et se distinguent par une auto-organisation qui se forme pendant la construction de la structure.

L'apparition et le développement des structures hiérarchiques ne sont pas dus au hasard car c'est la seule manière d'accroître l'efficacité, la fiabilité et la stabilité de systèmes ayant une complexité moyenne ou élevée.

Les systèmes simplifiés ne nécessitent pas de hiérarchie, car l'interaction se produit par des liens directs entre les éléments. Dans des systèmes complexes, des interactions directes entre tous les éléments sont impossibles (il faut une quantité trop importante de liens). Pour cette raison, seuls des contacts directs entre les éléments d'un même niveau sont conservés et les liens entre les niveaux sont nettement réduits.

Un aspect typique d'un système hiérarchique :



Le tableau 1 présente des niveaux hiérarchiques tirés du domaine de la technique (G.S. Altshuller. *Formules téméraires de la créativité*¹², Pétrouzavodsk, "Karélia", 1987, p. 17-18).

¹² Альтшуллер Г.С. в кн.: *Держкие формулы творчества*. Петрозаводск, "Карелия", 1987, с.17-18

Tableau 1

Niveau (rang du ST)	Nom du système	Exemple	Analogie dans la nature
1	Technosphère	Technique + hommes + ressources + système de consommation	Biosphère
2	Technique	Toute la technique (toutes les branches)	Faune
3	Une branche de la technique	Transport (tous les modes de transport)	Type
4	Secteur d'activité	Transport aérien, automobile, ferroviaire	Classe
5	Entreprise	Usine, métro, aéroport	Organisme
6	Agrégat	Système : locomotive – wagons – rails	Organes de corps : cœur, poumons, etc.
7	Machine	Locomotive, automobile, avion	Cellule
8	Mécanisme hétérogène (ensemble d'éléments permettant de transformer l'énergie et la substance d'un type en un autre)	Oscillateur électrostatique, moteur à combustion interne	Molécules ADN, ARN, ATP (Adénosine TriPhosphate)
9	Mécanisme homogène (ensemble d'éléments permettant de transformer l'énergie et la substance sans modifier leur type)	Cric à vis, chariot, équipement de voile, montre, transformateur, jumelles	Molécule d'hémoglobine capable de transporter l'oxygène
10	Ensemble d'éléments	Axe et deux roues (une nouvelle propriété – possibilité de rouler)	Molécules complexes, polymères
11	Couple de pièces	Vis et écrou, axe et roue	Molécule formée par des radicaux différents, par exemple $C_2H_5-C=O$
12	Pièce hétérogène (lors de la division, elle forme des parties inégales)	Vis, clou	Chaîne de carbone asymétrique : -C-C-C-C-C-C-
13	Pièce homogène (lors de la division, elle forme des parties identiques)	Fil de fer, axe, poutre	Chaîne de carbone : -C-C-C-C-C-C-
14	Substance hétérogène	Acier	Mélanges, solutions (l'eau de mer, l'air)
15	Substance homogène	Fer chimiquement propre	Une substance simple (oxygène, azote)

Les propriétés principales des systèmes hiérarchiques :

1) La dualité des propriétés des éléments dans un système. Un élément possède simultanément des propriétés individuelles et systémiques.

En entrant dans un système, un élément perd sa propriété d'origine. La propriété systémique "étouffe" la manifestation de qualités propres d'un élément. Cependant cela ne se

produit jamais complètement. Des combinaisons chimiques possèdent des propriétés physico-chimiques systémiques et conservent également les propriétés des éléments qui les constituent. Toutes les méthodes qui permettent d'analyser la composition d'une substance (spectrale, résonance nucléaire magnétique, radiographique, etc.) reposent sur ce phénomène. Plus la structure hiérarchique d'un système est complexe, plus ses propriétés individuelles sont élevées, plus elles apparaissent nettement dans le super-système et plus la structure est détachée des autres systèmes du super-système. Les éléments de niveau inférieur se simplifient, parce qu'un système n'attend de ces éléments que les propriétés lui permettant d'exécuter sa fonction utile. En fin de compte, les éléments perdent leur originalité, leur individualité concrète et deviennent indifférents à leur forme matérielle individuelle.

Pour les éléments, leur perte d'individualité est la contrepartie de leur capacité à représenter certains aspects des liens systémiques dans la hiérarchie. Ce phénomène est identique dans la société : un homme à l'usine n'est pas un sujet, ni une individualité unique dans son genre, ni le créateur de son milieu, il est un élément du système.

Cette propriété des systèmes hiérarchiques est à l'origine d'un type d'inertie psychologique très répandu : un innovateur ne voit qu'une seule des propriétés d'un élément (la propriété principale et systémique) et ne perçoit pas la multitude des anciennes propriétés individuelles.

2) La domination des niveaux inférieurs par les niveaux supérieurs caractérise une subordination principale de la hiérarchie (par analogie, dans la société on parlera d'autoritarisme).

Le plus bas niveau de la hiérarchie est un organe de travail ou sa partie, une zone, une surface de travail (chaque sous-système a son organe de travail). Par conséquent, l'énergie et toutes les actions de contrôle (un signal par exemple) aboutissent obligatoirement à l'organe de travail en le faisant fonctionner d'une manière strictement définie. Dans ce sens, l'organe de travail est l'élément le plus soumis d'un système. Par contre, rappelons que l'organe de travail est l'élément primordial pour la construction du ST : il définit la structure qui permettra la réalisation de la FUP.

Souvent la domination des niveaux supérieurs atteint un élément encore plus loin que l'organe de travail : l'objet. Des systèmes techniques adaptent les objets, en en modifiant la forme suivant leurs modes de fonctionnement. Cette tendance de la technique à adapter l'environnement à ses besoins n'est pas naturelle (c'est l'inverse qui devrait se produire) ; elle est propre uniquement à la technique moderne, en grande partie brute et maladroite. La différence est d'autant plus nette et perceptible, entre des systèmes techniques standards et des objets naturels, des créations artisanales et artistiques de l'homme.

Exemples.

La fonction utile principale du transport ferroviaire est le volume de marchandises transportées. Pour cette raison, dans de nombreux pays, s'effectuent des recherches visant à cultiver des fruits et des légumes cubiques qui sont plus faciles à conditionner et à transporter. Des équipes travaillent par exemple sur les tomates (Bulgarie), les pastèques (Japon), les pommes de terre, les carottes, les betteraves, les concombres et les ananas (*La connaissance est notre force*¹³, 1983, № 12, p. 32). Des légumes et des fruits sont.

Aux Etats-Unis, on fabrique la saucisse d'œuf. On casse des œufs, on sépare dans une centrifugeuse le blanc du jaune et on forme lors de la congélation une "saucisse" (le jaune est

¹³ *Знание - сила*, 1983, № 12, с.32

au milieu). Si vous avez besoin d'un œuf sur le plat, coupez une tranche. Du point de vue de l'augmentation de la FUP (c'est-à-dire le transport des œufs), le problème est résolu.

Le brevet № 1 132 905 (Bulletin d'Information, 1985, № 1) présente un procédé de préparation des pommes de terre, des légumes et des fruits pour un traitement thermique (fig. 8) : on coupe les pommes de terre en tranches, on rassemble les tranches, puis on enlève la peau en bas, on les tourne à 180°, on les égalise et enlève l'épluchure du bas et ainsi de suite jusqu'à ce que la pomme de terre soit totalement épluchée.

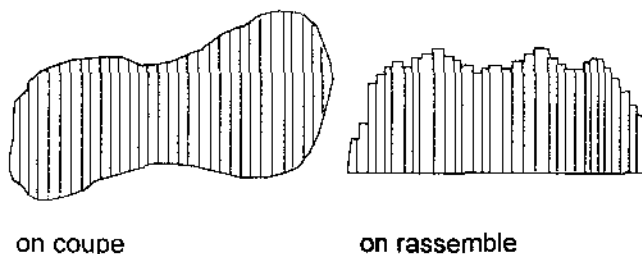


Fig. 8. Procédé de préparation des pommes de terre, de légumes et de fruits à un traitement thermique (Brevet № 1 132 905)

Concluons par un trait d'humour (*Inventeur et innovateur*¹⁴, 1984, № 8, p. 3 de la couverture) : "J'aimerais proposer à votre entreprise ma dernière innovation. C'est une cabine de rasage. Le client met quelques pièces, glisse sa tête dans un trou et deux rasoirs automatiques commencent à le raser. – Oui, mais chaque personne a une physionomie différente ! – Oui, mais uniquement la première fois !"

3) Insensibilité des niveaux supérieurs aux modifications des niveaux inférieurs mais au contraire, sensibilité des niveaux inférieurs aux modifications des niveaux supérieurs.

Des modifications aux niveaux des substances et des sous-systèmes de rangs inférieurs n'affectent pas la propriété systémique des ST et des super-systèmes de rangs supérieurs.

Exemple. Le principe de la télé-vision (transmission des images à distance) a déjà été utilisé dans les premiers systèmes mécaniques. Le passage aux lampes, transistors, micromodules n'a pas modifié cette propriété systémique dans son principe. La FUP augmentait, mais la propriété systémique ne changeait pas. Il est essentiel pour un super-système que les sous-systèmes remplissent leurs fonctions, alors que les matériaux et les principes physiques utilisés à ces fins sont sans importance. Cette thèse possède une conséquence fondamentale pour l'innovation. Admettons que se pose comme problème l'évacuation efficace de la chaleur d'un transformateur dans la télévision à lampes (la puissance consommée est alors de 400 Watts). L'innovateur peut chercher longtemps et par des voies différentes à évacuer la chaleur, à inventer de nouveaux sous-systèmes, à augmenter la puissance nominale du transformateur pour baisser la température d'échauffement, etc. Toutefois, en montant d'un niveau (en passant ainsi au niveau du bloc d'alimentation), il est possible de résoudre le problème tout à fait autrement (par exemple, par un régime d'alimentation par impulsion) et d'effectuer des modifications à un niveau supérieur (par exemple, en remplaçant le schéma de lampes par des transistors) ; il est possible d'exclure totalement le problème de la puissance consommée trop importante : celle-ci baissera, admettons jusqu'à 100 Watts, ce qui est une valeur acceptable.

4) Filtrage des fonctions utiles aux niveaux hiérarchiques

¹⁴ *Изобретатель и рационализатор*, 1984, № 8, с.3

Une structure hiérarchique correctement organisée détermine à chaque niveau une fonction utile. Ces fonctions s'additionnent, en se renforçant mutuellement, au niveau suivant. Par ailleurs, des fonctions nuisibles à chaque niveau sont réprimées ou, tout au moins, ne se multiplient pas.

La FUP se forme principalement aux niveaux inférieurs à partir de l'organe de travail. Les niveaux suivants renforcent plus ou moins considérablement la fonction utile. Avec l'augmentation du nombre de niveaux, la croissance de la FUP ralentit, par conséquent les systèmes ayant un nombre élevé de niveaux hiérarchiques sont inefficaces (les dépenses en MDE commencent à dépasser le gain en FUP). Le dernier niveau supérieur n'accomplit habituellement que des fonctions de coordination. Il ne devrait d'ailleurs y avoir qu'un seul niveau de ce type.

Plus le nombre de niveaux hiérarchiques est élevé, plus la structure est flexible, moins les liens entre les éléments sont rigides, plus ils sont faciles à déplacer et à substituer. Aux niveaux inférieurs, la hiérarchie et les liens sont plus rigides, la structure est strictement définie par la nécessité de remplir la FUP. Par exemple, il est impossible de placer une mèche dans un tube de transmission de chaleur à l'extérieur du corps, car les paramètres de fonctionnement d'une mèche et sa structure sont rigoureusement déterminés. Par contre, aux niveaux supérieurs où la fonction est la répartition de la chaleur, recirculation, régulation, etc. les changements les plus radicaux sont possibles.

3.4. Organisation

3.4.1. Notion générale

L'objectif de la théorie d'évolution des systèmes techniques consiste à développer les lois de synthèse, de fonctionnement et d'évolution de ces systèmes techniques. L'organisation est un élément d'une grande importance dans les trois périodes d'existence d'un système. Elle apparaît simultanément avec la structure. En fait, *l'organisation est un algorithme de fonctionnement mutuel des éléments d'un système dans l'espace et le temps.*

Un biologiste suisse, Bonnet (XVIII^e s.), écrivait : "Les liens fonctionnels entre toutes les parties constituant le corps sont tellement diversifiés et variés, que les parties sont indissociables et leur affinité extrême, et qu'elles ont dû naître en même temps. Des artères supposent l'existence de veines, les fonctions des unes comme des autres supposent l'existence de nerfs, qui supposent à leur tour l'existence d'un cerveau, ce dernier supposant l'existence d'un cœur. Chaque condition prise à part est une suite de conditions" (Gnédenko B.V. et autres, *Chercher conseil dans la nature*¹⁵. Moscou : Znanie, 1977, p. 45).

L'organisation naît au moment où, entre les éléments, apparaissent des liens objectifs, régis par les lois, accordés et stables dans le temps. Par ailleurs, certaines propriétés d'un élément prennent de l'importance (elles fonctionnent, se réalisent, se renforcent) et d'autres se limitent, se neutralisent, se dissimulent. Des propriétés utiles se transforment au cours du fonctionnement en fonctions, c'est-à-dire en actions et en comportements.

L'organisation apparaît que si la force des liens entre les éléments du système (et/ou leurs propriétés) est supérieure à la force des liens avec des éléments n'appartenant pas au système.

¹⁵ Гнеденко Б.В. и др. *За советом в природу*. М.: Знание, 1977, с.45

Avec l'apparition de l'organisation, l'entropie dans un système nouveau-né baisse par rapport à l'environnement. L'environnement d'un ST est le plus souvent constitué d'autres systèmes techniques. Ainsi, l'entropie est une dimension inutile pour une FUP donnée.

Le degré d'organisation représente le degré de prévisibilité de comportement d'un système lorsqu'il remplit la FUP. La prévisibilité absolue n'est possible que pour des systèmes qui ne fonctionnent plus, c'est-à-dire des systèmes "morts" ; sinon elle est impossible. Une imprévisibilité complète a lieu quand le système n'existe pas ou quand il est désorganisé. La complexité d'organisation se caractérise par le nombre et la diversité des éléments et des liens, ainsi que par le nombre de niveaux dans la hiérarchie.

La complexité d'organisation augmente avec la croissance d'un ST et décroît avec sa réduction. L'organisation semble être intrinsèque à la substance. Lors de la croissance dans des sous-systèmes utiles et fonctionnels, les principes d'organisation (conditions d'interaction, liens et fonctions) se précisent (lors de la recherche de la solution), puis l'organisation passe au micro-niveau (la fonction d'un sous-système est réalisée par une substance).

3.4.2. Liens

Le lien est une relation entre les éléments d'un système.

Le lien est un canal physique réel (de substance ou de champ) destiné à transmettre de l'énergie (E), de la substance (S), de l'information (I), sachant que, d'un point de vue technique, l'information ne peut jamais être immatérielle, elle se présente toujours sous forme de E ou de S.

La condition principale de fonctionnement d'un lien est la "différence de potentiels" entre des éléments, c'est-à-dire le gradient d'un champ ou d'une substance (un écart d'un équilibre thermodynamique – principe d'Onsager). Le gradient provoque une force motrice qui engendre un flux de E ou de S :

- gradient de température – flux de chaleur (conductibilité thermique),
- gradient de concentration – flux de substance (diffusion),
- gradient de vitesse – flux d'impulsions,
- gradient de champ électrique – courant électrique,

On trouve également des gradients de pression, de champ magnétique, de densité, etc.

Souvent dans des problèmes d'innovation, on a besoin d'organiser un type de flux au moyen d'un gradient d'un champ qui lui est étranger. On cherche, par exemple, à organiser un flux de substance (des billes creuses en nitinol) en utilisant un gradient de température dans un problème de régulation de température dans une piscine.

Les caractéristiques principales d'un lien sont le remplissage physique et la puissance. Le remplissage physique est la forme de champ ou de substance utilisée dans le lien. La puissance est l'intensité d'un flux de substance ou d'énergie. La puissance des liens dans le système doit être supérieure à la puissance des liens externes au système, de sorte que les éléments du système ne soient pas influencés par des modifications de l'environnement.

Les liens dans un système peuvent être de nature différente :

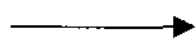
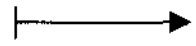
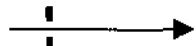
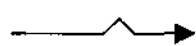
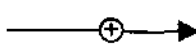




- nécessaires – pour réaliser la FUP,
- auxiliaires – pour accroître la fiabilité,

- nuisibles, excessifs ou excédentaires.

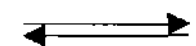
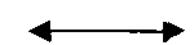



Selon le type d'agencement, les liens peuvent être *linéaires, circulaires, en forme d'étoile, transitoires, ramifiés ou mixtes*.

Les principaux types de liens dans des systèmes techniques sont :

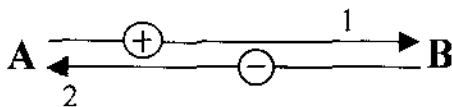
1. Les liens élémentaires

-  a) *unilatéral* (semi-conducteur)
-  b) *réflexif* (dû à l'action d'une cause extérieure)
-  c) *sélectif* (qui élimine des flux inutiles)
-  d) *tardif* (différé dans le temps)
-  e) *positif* (qui augmente la puissance lors de l'augmentation de "la différence de potentiels")
-  f) *négatif* (qui diminue la puissance lors de l'augmentation de "la différence de potentiels")
-  g) *neutre* (indifférent à la direction)
-  h) *nul* (aucun effet)
-  i) *projeté* (désiré)

2. Les liens combinés

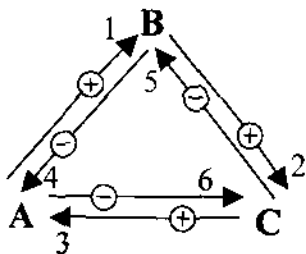
-  j) *bilatéral* (complètement conducteur)
-  k) *contre-lien* (qui est proportionnel à l'état des éléments entre lesquels passe le lien ; par exemple, les pôles d'un aimant et les potentiels d'une source de courant)
-  l) *asservissement positif* (lorsque la puissance d'un lien augmente la puissance de l'autre lien augmente également), c'est un mécanisme de stimulation mutuelle des fonctions qui mène à l'accroissement des processus
-  m) *asservissement négatif* (lorsque la puissance d'un lien augmente la puissance de l'autre lien baisse), c'est un mécanisme stabilisant qui mène à un équilibre stable ou à des oscillations autour du point d'équilibre
-  n) *double asservissement négatif*, ou un asservissement du type oppression mutuelle (lorsque la puissance d'un lien baisse la puissance de l'autre lien baisse également), mène à un équilibre instable qui finit par renforcer un des côtés et par dominer l'autre.

Lors de l'utilisation de liens combinés le système acquiert de nouvelles propriétés. Considérons un système composé de deux éléments avec un asservissement négatif :



Lorsque le potentiel A augmente, la puissance du lien positif 1 augmente, ce qui entraîne une augmentation du potentiel B. Cependant, le lien négatif 2 domine le potentiel A. Le système atteint rapidement un équilibre stable. La rupture du lien 1 provoque une augmentation du potentiel A sans domination de la part de B. La rupture du lien 2 provoque une augmentation du potentiel A simultanément avec le potentiel B (lien positif).

Dans un système composé de trois éléments, on voit apparaître une qualité encore plus forte.



L'augmentation du potentiel A provoque une augmentation du potentiel B, mais le lien 4 domine A ; le lien 2 fait augmenter C, mais le lien 5 diminue B et le lien 6 diminue C, etc. Cela signifie que tout élément qui a perdu son équilibre est tout de suite rééquilibré par les autres liens.

Lors de la rupture d'un lien, le rééquilibrage est rapidement retrouvé grâce à d'autres liens. De même, s'il s'agit de la rupture de deux liens.

Le système trouve un équilibre stable dans lequel un élément ne peut s'écarter qu'insensiblement de l'état d'équilibre.

Ceci est un exemple avec un lien combiné identique (asservissement négatif). D'autres effets encore plus surprenants apparaissent dans des systèmes avec des liens de types différents, incluant une grande quantité d'éléments, avec l'apparition de liens croisés (à commencer par un lien diagonal dans un carré). Une étude de la "superposition" de ces types de liens sur l'analyse vépole est indispensable.

L'augmentation du degré d'organisation d'un système est directement proportionnelle au nombre de liens entre les éléments. Plus les liens entre les éléments sont développés et plus les vépoles seront complexes. Comment augmenter le nombre de liens dans un vépole ? Il existe deux voies :

1. inclure les éléments d'un système dans des liens avec des super-systèmes,
2. utiliser des niveaux inférieurs d'organisation d'un sous-système ou d'une substance.

Lorsque le nombre de liens d'un élément augmente, la quantité de propriétés utiles des éléments augmente.

3.4.3. Contrôle

Une des propriétés importantes d'organisation est la possibilité de contrôler, c'est-à-dire de modifier et de maintenir l'état des éléments, durant le processus de fonctionnement d'un système. Le contrôle s'effectue suivant des liens spéciaux et représente une suite de commandes dans le temps. Le contrôle, consistant à suivre l'écart d'une valeur est le moyen le plus fiable et le plus répandu.

3.4.4. Facteurs détruisant l'organisation

Ces facteurs comprennent trois groupes d'actions nuisibles :

- ❑ extérieures (en provenance du super-système, de la nature, de l'homme),
Les facteurs extérieurs détruisent des liens si leur puissance est supérieure à la puissance des liens à l'intérieur d'un système.
- ❑ intérieures (forçage ou renforcement mutuel occasionnel de propriétés nuisibles),
Les facteurs intérieurs sont initialement présents dans un système, néanmoins leur quantité croît avec le temps à cause de défaillances dans la structure.
- ❑ entropiques (autodestruction d'éléments à la fin de leur durée de vie).
L'usure de pièces (perte d'une partie de substance par le système), la détérioration de liens (fatigue de ressorts, rouille) sont quelques exemples de facteurs entropiques.

3.4.5. Rôle de l'expérience dans le processus d'amélioration de l'organisation

L'expérience est un essai scientifique visant à identifier la partie déficiente d'un ST lorsqu'on essaie d'augmenter la FUP. L'expérience consiste à intervenir activement dans le fonctionnement d'un ST, à créer un milieu (modifier les facteurs de l'environnement), des conditions particulières et à observer le comportement du système à l'aide de moyens et de méthodes spéciales.

L'expérience la plus productive est une expérience réelle. Elle convient à la grande majorité de ST (excepté des ST de taille importante et des ST dangereux, comme les centrales nucléaires).

Une expérience sur des modèles n'est fiable et accessible que pour des systèmes simples dont le comportement est facile à prévoir.

Seule l'expérience réelle est capable d'assurer un sous-produit important, des résultats inattendus qui apportent souvent de nouvelles connaissances.

Par exemple, pendant le vol d'essai d'un satellite sans pilote lors de la mise en marche des moteurs auxiliaires de freinage, le satellite a soudainement changé d'orbite et on n'a pas réussi à le faire rentrer sur Terre. On se rappelle que les spécialistes ont été très déçus. Toutefois, S.P. Korolev a vu à l'époque dans ce changement d'orbite non planifié la première expérience de manœuvre dans l'espace.

– Les vaisseaux atterriront sur la Terre, – a dit le constructeur principal à ses adjoints,
– au bon endroit et à l'heure exacte ! La prochaine fois sans défaillir !

Depuis de nombreux vaisseaux spatiaux de destination diverse – à orientation scientifique comme économique – sont rentrés sur Terre (B. Pokrovski, *A la rencontre de l'aurore*¹⁶, La vérité, 1980, le 12 juin).

3.5. Propriété systémique

3.5.1. Propriétés dans un système

Tous les éléments d'un système, ainsi que le système dans son ensemble, possèdent un certain nombre de propriétés, en particulier :

1. *De structure et de substance* : propriétés de substance définies par sa composition, par le type et les particularités physiques de ses composants (eau, air, acier, béton).
2. *De structure et de champ* : par exemple, le poids est une propriété indissociable de tout élément, de même que les propriétés magnétiques, la couleur.
3. *De fonctions* : des propriétés spécialisées qui peuvent être obtenues à partir de différentes combinaisons de substances et de champs, pourvu qu'elles possèdent la fonction requise, par exemple des matelas thermo-isolants.
4. *Systémiques* : des propriétés communes. A la différence des propriétés 1 à 3, elles n'équivalent pas aux propriétés des éléments constituant le système. Ces propriétés surviennent "soudainement" lors de la formation d'un système. Un tel complément inattendu est un avantage principal dans la synthèse d'un nouveau ST.

Il convient de distinguer deux types de propriétés émergentes d'un système :

- **effet systémique** – un accroissement (ou une diminution) très important des propriétés des éléments,
- **qualité systémique** – apparition d'une nouvelle propriété (super-propriété – vecteur des propriétés existantes) n'appartenant à aucun des éléments avant qu'ils soient inclus dans le système.

Cette particularité dans le développement d'une réalité objective a déjà été remarquée par des penseurs antiques. Par exemple, Aristote affirmait que le tout est toujours plus grand que la somme des parties le constituant. A.A. Bogdanov a formulé cette thèse pour les systèmes : *un système révèle un certain accroissement de propriétés et assure une super-propriété par rapport aux propriétés initiales* (1912).

Pour définir plus précisément une propriété systémique d'un ST, il est possible d'utiliser une méthode très simple : il faut diviser le système en parties composantes et regarder quelle propriété a disparu. Par exemple, aucune partie d'un avion ne peut voler séparément, tout comme un système "tronqué" d'avion ne peut remplir sa fonction sans aile, sans empennage ou gouvernail. D'ailleurs, c'est un moyen persuasif de prouver que tous les objets dans le monde sont des systèmes : segmentez le charbon, le sucre, une aiguille – à quelle étape de division cessent-ils d'être eux-mêmes, perdent leurs qualités principales ? Tout ce qui les diffère, c'est la durée du processus de division – l'aiguille cesse d'être une aiguille

¹⁶ Покровский Б. *Заре навстречу*. Правда, 1980, 12 июня

après être divisée en deux parties, le charbon et le sucre – après être segmentés jusqu'à l'atome. Apparemment la loi dite dialectique de la transformation des changements quantitatifs en changements qualitatifs représente uniquement une partie d'une loi plus générale, notamment de *la loi de formation d'une propriété systémique*.

Exemple d'apparition d'un effet systémique.

Pour la purification définitive des eaux-vannes (eaux usées à évacuer) d'une usine hydrolithique, on expérimentait deux procédés – ozonisation (oxydation par l'ozone) et adsorption (système de filtres à charbon actif). Cependant aucun des procédés n'était efficace. Un procédé combiné a abouti à un effet remarquable. On a obtenu des chiffres requis avec une réduction de 2 à 5 fois des dépenses d'ozone et de charbon actif par rapport uniquement à l'adsorption ou à l'ozonisation. (*Information expresse de l'Institut National de Recherche de l'Information dans la Construction, URSS*¹⁷, Série 8. 1987. № 8, p. 11-15)

Il existe beaucoup d'exemples d'apparition de propriétés systémiques dans le domaine de la physique (notamment parmi les effets et les phénomènes physiques). Par exemple, le champ électromagnétique possède la propriété de se répandre dans l'espace à une distance infinie et une propriété de conservation que des champs électriques et magnétiques séparément ne possèdent pas.

A proprement parler, toutes les sciences naturelles ne s'occupent de rien d'autre que d'étudier des lois systémiques de combinaison des parties en un tout ainsi que des lois d'existence et d'évolution de ce dernier. Beaucoup de connaissances démontrant des mécanismes concrets d'apparition de super-propriétés (effets systémiques) dans la nature vivante et morte – dans la chimie, physique, biologie, géologie, astronomie, etc. sont acquises. Mais à ce jour il n'existe pas de généralisations, c'est-à-dire de lois universelles d'évolution des systèmes.

3.5.2. Mécanisme de formation des propriétés systémiques

La société est régie également par les lois systémiques. Voilà ce que dit Karl Marx de l'apparition de nouvelles propriétés dans des formations sociales : "Les animaux ne peuvent pas réunir ensemble différentes propriétés de leur espèce, ils ne peuvent rien faire pour l'intérêt *général* ni l'utilité *générale* de leur espèce. Il en est tout autrement quand il s'agit de l'homme. Dans ce cas, toute sorte de dons et d'activités s'avèrent utiles les uns pour les autres, car les hommes savent réunir leurs *diverses* compétences en un tout commun..." (Karl Marx, Friedrich Engels. vol. 42, p. 143).

Voici un simple exemple "mécanique" d'apparition d'une propriété systémique : admettons qu'il vous faille traverser rapidement une place remplie de monde. Il est clair que vous dépenserez énormément de force et de temps pour surmonter la "friction contre la foule". Maintenant imaginez-vous que la foule a formé une structure ordonnée (par exemple, des rangs), la résistance à celui qui court entre les rangs devient alors pratiquement inexistante.

A. Bogdanov raisonne ainsi : "L'exemple le plus typique est l'interférence d'ondes lumineuses : si les ondes coïncident (par exemple, les ondes (1) et (2) en phase), alors deux vibrations donnent une force quadruple ; si elles ne coïncident pas (les ondes (1) et (3) en opposition de phase), alors la combinaison de deux ondes lumineuses donne de la chaleur. Il existe un cas intermédiaire : on a un déphasage d'un quart de période (à la partie ascendante

¹⁷ Э.И. ВНИИИС Госстроя СССР, серия 8, 1987, вып. 8, с.11-15

de (1) correspond une demi partie descendante et une demi partie ascendante de (4)). On obtient une simple addition, une somme de termes : l'intensité de la lumière est double. L'augmentation ou la diminution de la somme des propriétés d'un système dépend du type de combinaison qui existe entre les éléments (Science organisationnelle universelle : *Tectologie*, vol. 2, Mécanisme de divergence et de désorganisation¹⁸, M. : Société "Maison d'édition des écrivains de Moscou", 1917, p. 11).

Encore un exemple : la vitesse du son dans un liquide, dans l'eau par exemple, est de l'ordre de 1 500 m/sec., dans un gaz (par exemple, dans l'air) 340 m/sec. et dans un mélange d'eau et de gaz (5 % du volume de bulles de gaz) la vitesse baisse jusqu'à 30 à 100 m/sec.

Tout élément possède plusieurs propriétés. Certaines parmi elles s'éteignent lors de la formation de liens, d'autres, au contraire, se précisent ou bien certaines propriétés s'additionnent et d'autres se neutralisent. Il existe trois cas possibles d'apparition d'une propriété systémique :

- ❑ des propriétés positives s'additionnent, se renforcent, alors que des propriétés négatives restent invariables (une chaîne, un ressort) ;
- ❑ des propriétés positives s'additionnent, alors que des propriétés négatives se détruisent (deux soldats dos contre dos forment une défense en cercle, des propriétés nuisibles "de dos" ont disparu) ;
- ❑ des propriétés négatives converties s'ajoutent à la somme de propriétés positives (nuisance transformée en utilité).

¹⁸ *Всеобщая организационная наука. (Тектология), т.2. Механизм расхождения и дезорганизации. Товарищество "Книгоиздательство писателей в Москве", М., типогр. Я.Г.Сазонова, 1917, с.11*

4. LOIS D'EVOLUTION DES SYSTEMES TECHNIQUES

4.1. Généralités

Les lois d'évolution des systèmes techniques, sur lesquelles reposent tous les mécanismes essentiels de résolution des problèmes d'innovation, ont été formulées pour la première fois par G.S. Altshuller dans son ouvrage "*La créativité en tant que science exacte*¹⁹" (M. : Sovetskoe radio, 1979, p. 122-127) :

1. *Intégralité des parties du système.*
2. *Libre passage d'énergie dans le système.*
3. *Concordance des rythmes des parties du système.*
4. *Augmentation du degré d'idéalité du système.*
5. *Développement inégal des parties du système.*
6. *Transition vers le super-système.*
7. *Transition du macro-niveau vers le micro-niveau.*
8. *Augmentation du degré de vépolisation.*

Les lois ont été regroupées en trois catégories appelées "statique" (lois 1 à 3), "cinématique" (lois 4 à 6) et "dynamique" (lois 7 et 8). On peut constater une relation reliant ces groupes au modèle "vie, évolution, mort" des systèmes techniques, en d'autres termes, à la courbe en S qu'Altshuller a utilisé en vue d'illustrer des processus évolutifs dans la technique. Les lois de la "statique" sont propres à la période de naissance et de formation des ST, les lois de la "cinématique" correspondent à la période de croissance et d'épanouissement, les lois de la "dynamique" caractérisent l'étape finale d'évolution et la transition vers le nouveau système.

Par la suite Altshuller a formulé une loi supplémentaire du groupe "cinématique" (*Trouver l'idée*²⁰, Novosibirsk, Naouka, 1986, p. 59) :

9. *Augmentation du degré de dynamisation des systèmes.*

Cet ouvrage nous propose une analyse plus détaillée de la loi d'augmentation du degré de vépolisation (p. 79) et un nouveau mécanisme de la loi de transition vers le super-système – évolution "mono-bi-poly" (p. 90-97). L'auteur essaye également d'établir un schéma global d'évolution des ST (p. 100-120) fondé sur l'enchaînement "mono-bi-poly" et émet des hypothèses sur sa forme hélicoïdale.

Dans le présent écrit, les lois d'évolution des ST ont conservé en général les formulations proposées par G.S. Altshuller.

Le schéma général d'évolution des ST (modèle d'évolution de la technique) est basé sur notre écrit précédent datant de 1984 (Y.P. Salamatov, I.M. Kondrakov, "*Idéalisation des systèmes techniques. Recherche et conception d'un modèle d'évolution des systèmes*

¹⁹ Г.С.Альтшуллер. *Творчество как точная наука* М.: "Советское радио", 1979, с.122-127

²⁰ Г.С.Альтшуллер. *Найти идею*. Новосибирск, "Наука", 1986, с.59

techniques dans l'espace et dans le temps (modèle d'une onde d'idéalisation) sur l'exemple d'évolution du ST "Caloduc". Manuscrit, Krasnoïarsk, 1984²¹).

4.2. Lois en tant que base de TRTS

Le processus d'évolution de la technique est la résultante de l'activité humaine consciente. Et puisque l'homme agit selon des lois objectives universelles (même s'il ne le soupçonne pas), l'évolution de la technique est objective et conforme à la loi. Par conséquent, il est possible de connaître ces lois et de s'en servir dans des buts précis. Cet axiome est le fondement de la **théorie d'évolution des systèmes techniques (TRTS)** en cours de conception.

En règle générale, toute théorie scientifique en tant que système de connaissances doit expliquer la naissance et le fonctionnement de toute sorte d'objets, de phénomènes, de notions réelles et prédire leur évolution. De plus, ce système de connaissances doit se soumettre obligatoirement à des tests expérimentaux et pratiques. Maintenant, TRTS remplit tous ces critères ce qui a été confirmé maintes fois dans la conception de produits industriels innovants.

Le principe de base de TRTS est concrétisé dans des lois qui, à leur tour de rôle, sont développées et détaillées dans les règles de leur application, dans les standards, dans les principes d'élimination des contradictions, dans l'analyse vépole et dans ARIZ.

Toute théorie n'est qu'un reflet (plus ou moins précis) de la diversité, de la complexité et de l'aspect contradictoire des processus réels d'évolution. Dans ce sens, le processus de connaissance est infini et l'émission de nouvelles versions, de nouvelles hypothèses et de nouvelles déductions est un état naturel d'une théorie en cours de développement. Cependant la logique d'évolution des systèmes réels est la seule limite des raisonnements logiques et théoriques. De cela découle la nécessité de vérification pratique de toutes les opinions et conjectures.

Il convient de diviser les lois en quatre groupes :

- lois de *formation de structure* formulant les conditions d'apparition des structures ;
- lois de *fonctionnement* expliquant les conditions d'apparition et d'évolution des liens et de leur organisation ;
- lois d'*évolution* explicitant les forces motrices et les mécanismes de transformation des systèmes par le biais de l'apparition et de l'élimination de contradictions ;
- lois d'*interaction* avec d'autres systèmes, sous-systèmes et avec l'environnement.

La loi d'évolution des ST est une relation substantielle, durable et répétitive entre les éléments à l'intérieur d'un système et avec l'environnement au cours de l'évolution progressive du système, autrement dit, pendant la transition du système d'un état vers un autre en vue d'augmenter sa fonction utile.

Les lois se manifestent lors de l'analyse de grands groupes de faits (innovations présentées dans la base de données des brevets, recherches historiques et techniques). Toutefois, dans la technique, les lois fonctionnent spontanément et il n'y a jamais de garantie

²¹ Саламатов Ю.П., Кондраков И.М. *ИДЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ*. Исследование и разработка пространственно-временной модели эволюции технических систем (модель "бегущей волны идеализации") на примере развития ТС "Тепловая труба", Красноярск. сентябрь 1983 - июнь 1984. Рукопись.

que le groupe sélectionné de faits, c'est-à-dire un débris infime de réalité, contienne des relations systémiques durables, substantielles et qui ne sont pas dues au hasard. C'est pourquoi la connaissance des lois passe forcément par la méthode d'approche successive : sélection d'innovations importantes, définition des principes d'élimination des contradictions techniques, détermination de combinaisons durables de principes et d'effets physiques, puis identification d'étapes standards dans l'évolution des systèmes techniques. Il est impossible d'exclure de toutes les étapes de recherche les facteurs subjectifs tels que les goûts, l'individualité de l'appréciation, l'absence de critères quantitatifs.

Le seul critère universel qualitatif de la progressivité des changements dans l'évolution de tout système technique est *l'idéalité*.

L'augmentation du degré d'idéalité est un repère dans la quantité immense d'informations portant sur le domaine de la technique.

Le rôle supérieur de la loi d'idéalisation des ST ressort dans tous les mécanismes de TRIZ et c'est bien cette loi qui détermine les tendances générales d'évolution de la technique. En réalité, toutes les autres lois sont une réalisation concrète de cette loi primordiale à différents stades d'évolution de la technique.

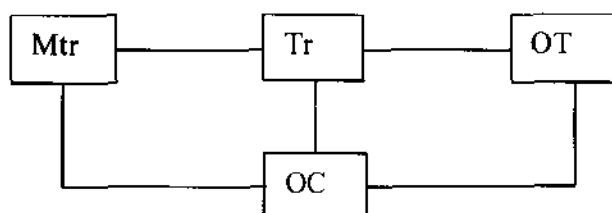
4.3. INTEGRALITE DES PARTIES

4.3.1. Formulation et notions principales

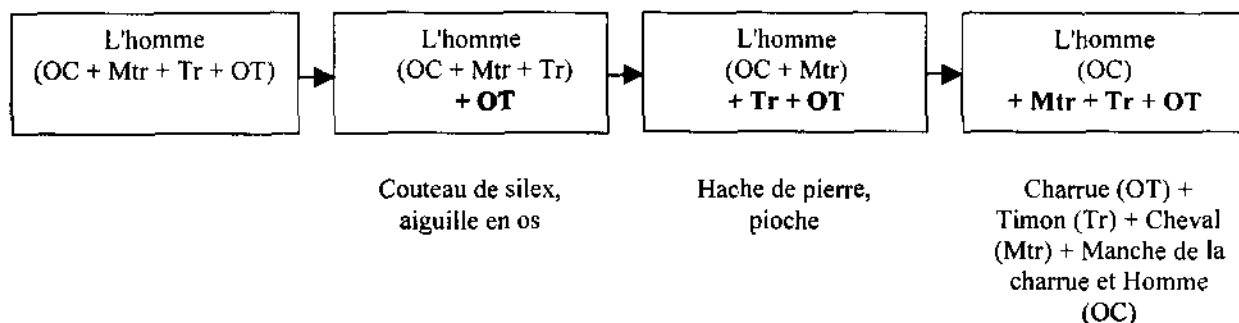
Première loi : Une condition indispensable pour qu'un système technique soit opérationnel est une aptitude minimale de toutes les parties principales du système à fonctionner.

Chaque ST doit être composé de quatre parties : un moteur (Mtr), une transmission (Tr), un organe de travail (OT) et un organe de commande (OC).

Pour synthétiser un ST, ces quatre parties et leur aptitude minimale à remplir les fonctions du système sont indispensables. Si une des parties est absente, alors ce système n'est pas encore un ST. Si une partie n'est pas opérationnelle, alors le ST ne "survivra" pas.



Les premiers ST se sont développés à partir des outils de travail : il fallait augmenter la fonction utile des processus de travail, mais l'homme n'était pas capable d'assurer la puissance nécessaire. Alors le moteur a remplacé la force de l'homme, on a vu apparaître la transmission (lien qui transmet l'énergie du moteur vers l'organe de travail) et l'outil de travail s'est transformé en organe de travail d'une machine dans laquelle l'homme jouait uniquement le rôle d'un organe de commande.



Par exemple, une pioche et un homme ne sont pas encore un ST. La naissance d'un ST est liée à l'invention de la charrue à l'époque néolithique : la charrue (organe de travail) retourne la terre, le timon (transmission) s'attache à une bête de trait (moteur), l'homme (organe de commande) dirige la charrue. Au début, on n'utilisait la charrue que pour ameublir le sol. Mais le milieu extérieur (par exemple, les paramètres des sols tels que la dureté, l'humidité, la profondeur) forçait l'homme à chercher une meilleure forme de charrue. Ensuite, c'est le besoin qui a augmenté : pour détruire les mauvaises herbes il fallait non seulement ameublir, mais aussi retourner le sol. On a inventé le versoir (partie de la charrue qui verse sur le côté la terre que le soc arrache). En évoluant, le versoir a adapté une forme légèrement courbée (demi-cylindrique ou hélicoïdale). Au XVIII^e siècle, on a inventé une charrue entièrement métallique, au XX^e siècle, un tracteur, etc.

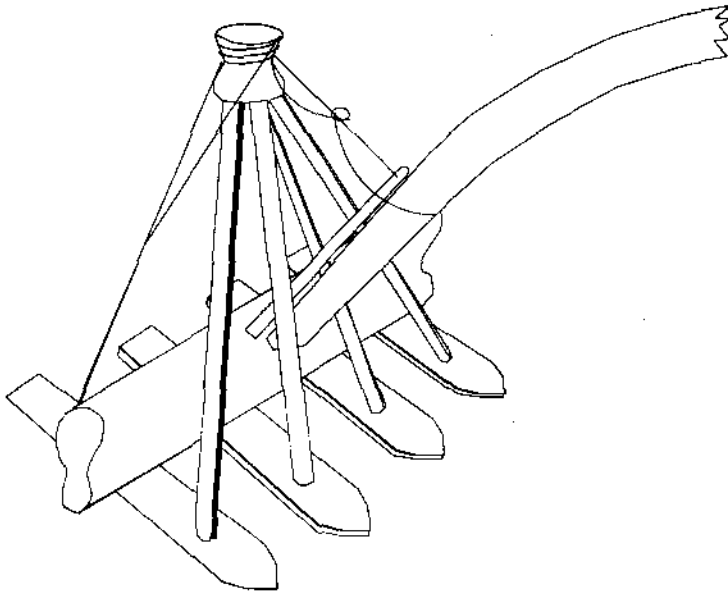
K. Marx dans le "Capital" (chapitre sur les machines) a analysé en détail le processus de transformation des outils de travail en organes de travail des machines. Il a isolé pour la première fois les parties principales des machines [par exemple, dans le moulin à eau – le moteur (la roue à eau), la transmission (l'engrenage) et l'organe de travail (les meules)] et a souligné une des particularités essentielles d'évolution de la technique, notamment l'élimination de l'homme du domaine de la production. D'abord l'homme éliminé du ST passe à l'organe de commande, puis OC se transforme également de l'instrument en un système technique et l'homme se retrouve en dehors de ses limites (au "deuxième" étage de l'organe de commande) et ainsi de suite.

Dans la première édition de "*L'encyclopédie pour enfants*²²" (Vol. 5, M. : Maison d'édition APN RSFSR, 1960, p. 30) le système technique est décrit comme suit : "Une machine est composée des parties principales suivantes :

- a) moteur – source d'énergie mécanique ;
- b) organes exécutifs (de travail) qui accomplissent directement un travail utile ;
- c) mécanismes de transmission (transmissions) qui transforment le mouvement transmis du moteur vers les organes de travail ;
- d) systèmes de contrôle ;
- e) bâtis (carcasse, corps, armature) qui supportent toutes les parties de la machine".

Voici comment la charrue s'est transformée en semoir. Les paysans romains (III^e siècle av. J.-C.) utilisaient déjà des semoirs – prototype du semoir de James Cook inventé en 1783. Quatre socs de bois étaient assemblés par une traverse solide. Un pot en argile en forme d'entonnoir destiné à contenir le grain se fixait en haut sur quatre bâtons creux de bambou (tuyaux). Le laboureur complétait de temps à autre le réservoir par le grain de son sac à dos. Il devait taper légèrement le bambou pour que le grain "descende".

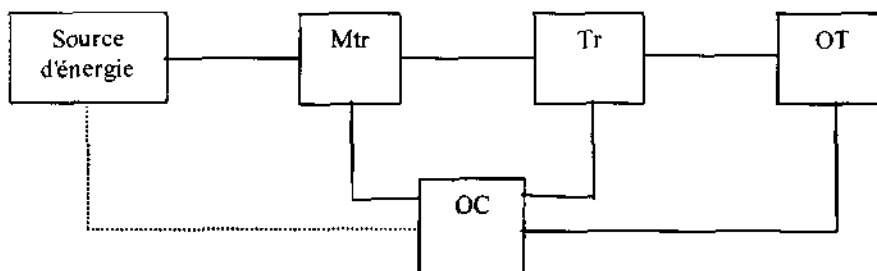
²² *Детская энциклопедия*. Том 5 "Техника". Издательство академии педагогических наук РСФСР, М., 1960г., с.30



Semoir romain (III^e siècle av. J.-C.), Musée des techniques et métiers de Calcutta.

4.3.2. Critère de distinction des systèmes techniques parmi d'autres objets techniques

Donc, un ST naît dès qu'un objet technique acquiert la capacité de remplir la FUP sans intervention de l'homme, c'est-à-dire à partir du moment où l'organe de travail est actionné non plus par l'homme, mais par une transmission et un moteur. Par ailleurs, il ne faut pas confondre le moteur et la source d'énergie ; ils peuvent coïncider, mais pas systématiquement. L'énergie peut venir de l'extérieur, y compris de l'homme. Elle se transforme dans le moteur en une forme d'énergie dont le ST a besoin.



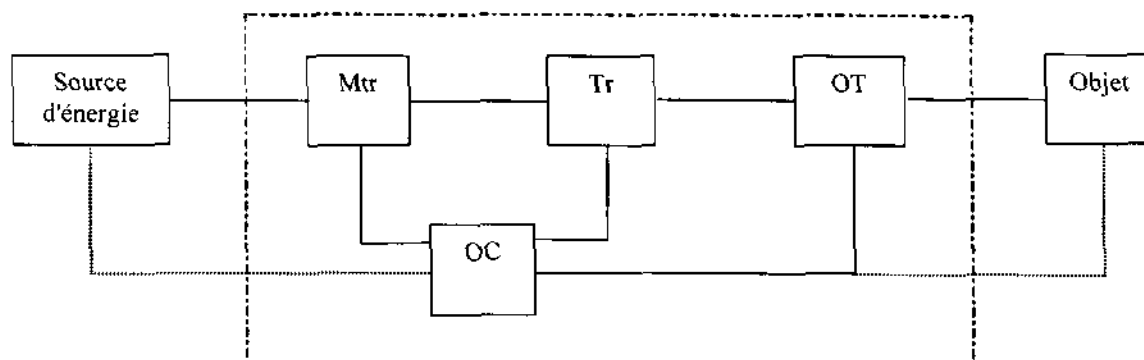
Le fait de connaître cette loi permet de déterminer sans erreur si un ensemble d'éléments est un système technique. Par exemple, l'arc est un ST, car il comprend un OT (flèche), une Tr (corde), un Mtr (corde tendue et arc courbé), l'homme dans ce cas est une source d'énergie et un organe de commande. Notez que l'un des éléments (corde) remplit une double fonction (Tr et Mtr). Cette particularité qu'est le cumul de fonctions apparaît souvent à la première étape de croissance des ST (transformation en un système complexe) et aux premières étapes de réduction des ST, encore éloignées du stade final de "simplification" (substitution du ST et de ses sous-systèmes par une substance idéale).

On reparlera de la réduction ultérieurement. En attendant, citons quelques exemples de cumul partiel de fonctions des éléments dans des ST :

- dans le problème de mesurage de la hauteur d'une grotte : le ballon (Mtr), le fil (Tr et OT – mesureur de la hauteur), l'homme (OC) [cf. *Problème de mesurage de la hauteur d'une grotte*. Annexes. Explications];

- dans le problème de contrôle de l'intégrité d'une dent de foreuse : la force qui casse l'ampoule (OC "comprenant" une substance odorante), une substance odorante (OT), un flux de gaz montants (Tr et Mtr), le nez de l'homme (l'objet "traité" par l'organe de travail). [cf. *Problème de contrôle de l'intégrité d'une dent de foreuse*. Annexes. Explications].

Si on inclut dans le schéma un objet, on obtiendra le schéma complet d'un ST opérationnel :

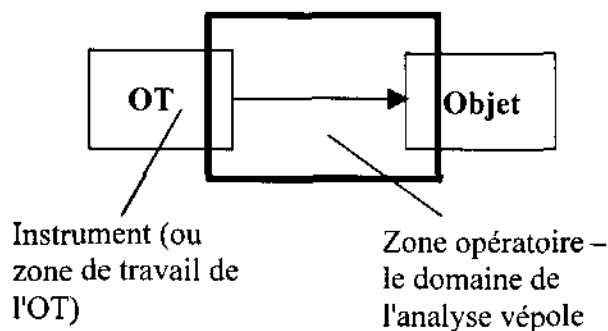


Les pointillés entourent les parties qui assurent l'intégrité d'un ST minimal opérationnel.

Propriété de la loi 1 : *Pour qu'un ST soit contrôlable, il faut qu'au moins une de ses parties soit contrôlable.*

Être contrôlable signifie changer ses propriétés, ses paramètres, selon les besoins de celui qui effectue le contrôle. Par exemple, une montgolfière destinée à monter verticalement est un ST contrôlable, car nous pouvons – bien que difficilement – contrôler sa montée et sa descente à l'aide d'une soupape qui laisse s'échapper l'air du ballon et à l'aide des sacs de sable qui servent de lest. Mais il suffit d'exiger trop du ballon – essayer d'augmenter la fonction utile par un déplacement horizontal – pour qu'il se transforme en un ST incontrôlable. L'aérostat restera un flotteur aérien incontrôlable jusqu'à ce qu'on introduise dans le ST un élément supplémentaire contrôlable, par exemple un moteur doté d'une hélice.

La définition analysée du ST est plus large que la notion du vépole. Le vépole est un modèle d'un ST minimal qui illustre la "lutte" et l'interaction des champs et des substances (les vépoles ne servent qu'à trouver une idée de la solution). Les ST réels doivent se déplacer, traiter des objets ou des informations, transformer l'énergie, etc. ; c'est pourquoi, lors de la transition d'un modèle vers un système réel, il est indispensable d'introduire toutes les parties du système.



4.3.3. Exemples permettant de déterminer correctement les parties du système

Lors de l'analyse des systèmes techniques, il n'est pas toujours possible de déterminer précisément et sans difficultés les parties du système.

En essayant de définir les parties il peut être utile de se poser les questions suivantes :

- Sur quoi porte l'action ? La réponse nous renseignera sur l'objet.
- Vers quoi conduit-on l'énergie ? On identifiera ici l'OT.
- Comment conduit-on l'énergie ? C'est la Tr qui joue ce rôle.
- Qu'est-ce qui fournit l'énergie ? C'est le Mtr.
- Quelle est la source d'énergie du moteur ? On identifiera ainsi la SE.

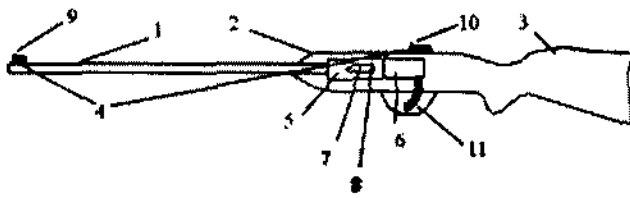
Exemple : le fusil.

- sur quoi porte l'action ? – la balle,
- vers quoi conduit-on l'énergie ? – la balle,
- comment conduit-on l'énergie ? – par le canon,
- qu'est-ce qui fournit l'énergie ? – les gaz de poudre,
- quelle est la source d'énergie du moteur ? – la réaction chimique (explosion de la poudre).

Si l'on s'en tient à cette expression des réponses, deux erreurs sont commises :

1. L'objet n'est pas déterminé correctement. Dans le cas du fusil, l'objet se trouve en dehors du système technique, c'est un cible. La balle est un organe de travail.
2. La transmission n'est pas déterminée correctement. L'énergie se transmet vers l'organe de travail par les gaz qui sont simultanément transmission et moteur (les gaz transforment l'énergie d'explosion en mouvement de translation) ; le canon – une partie du moteur – canalise le flux de gaz.

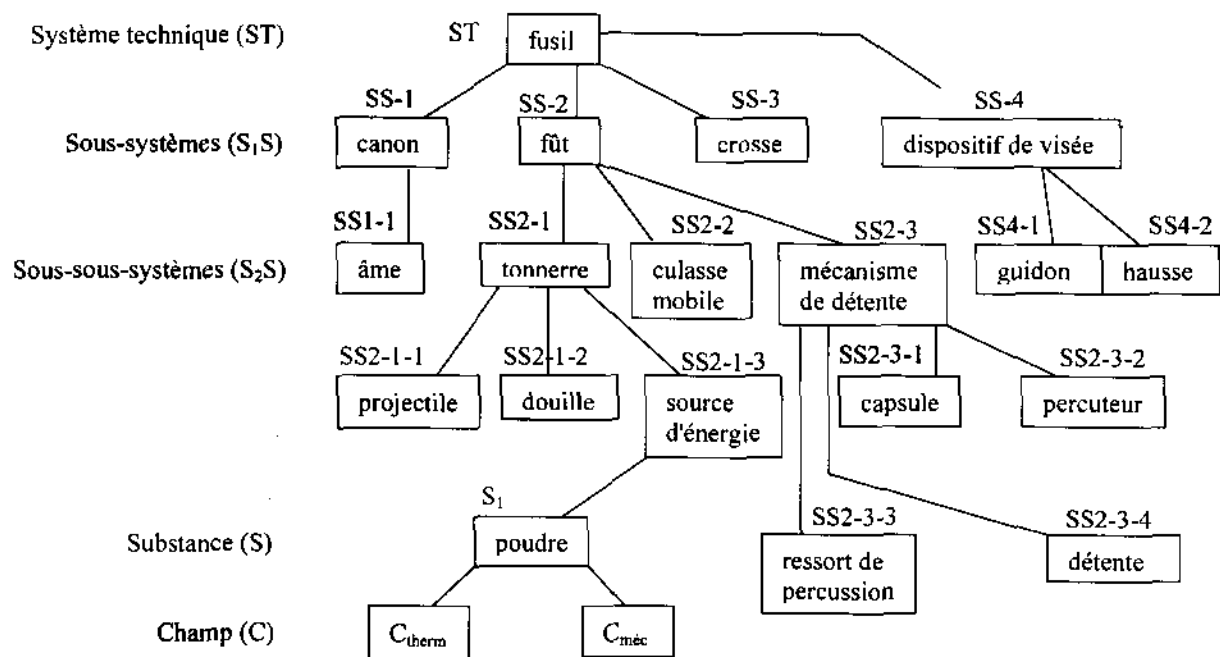
Schéma structurel d'un ST "fusil" : ses principales parties



1 – canon, 2 – fût, 3 – crosse, 4 – dispositif de visée, 5 – tonnerre, 6 – culasse mobile, 7 – balle, 8 – douille, 9 – guidon, 10 – hausse, 11 – détente

Structure hiérarchique d'un ST "fusil" :

Niveau :

**Exemple : la seringue.**

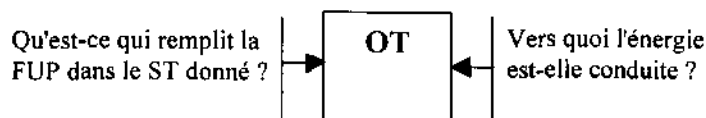
En répondant à la première question (sur quoi porte l'action ?), nous rencontrons déjà les premières difficultés :

- le médicament (le fluide) agit sur le corps (l'organisme),
- le piston exerce une pression sur le fluide,
- l'aiguille agit sur la peau (en la perçant).

Que faire dans ce cas ?

Rappelons que chaque ST a une FUP définie qui traduit le besoin de ce ST. La FUP d'une seringue consiste à introduire un médicament (un fluide) sous la peau.

C'est pourquoi pour déterminer plus précisément l'organe de travail, il est indispensable de poser deux questions :



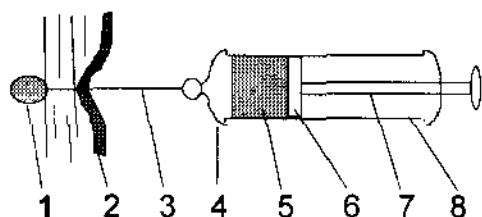
Les deux questions aboutissent à l'organe de travail.

Qu'est-ce qui remplit dans une seringue la FUP, autrement dit, introduit un fluide, exerce sur lui une pression ? – piston.

Qui reçoit l'énergie ? – le piston et ensuite le fluide.

Par conséquent, le piston est un organe de travail et le fluide est un objet.

Les autres parties : Tr – glissière, Mtr – glissière (elle équilibre le mouvement du doigt, transforme le mouvement de translation), SE – la main, le corps de pompe est une partie du moteur qui canalise le mouvement de la glissière et du piston.



1 – fluide, 2 – peau, 3 – aiguille, 4 – canule, 5 – fluide, 6 – piston, 7 – glissière, 8 – corps de pompe (canon).

Fig. 9. Système technique "seringue"

Et comment considérer l'aiguille ? – au premier abord, c'est un OT manifeste. Oui, c'est un organe de travail, mais d'un autre système auxiliaire, notamment d'un sous-système destiné à percer la peau. L'aiguille (OT), la canule et le canon (Tr) et la main (Mtr + SE) constituent un unique instrument destiné à agir sur la peau (Objet). L'aiguille en tant qu'élément auxiliaire disparaît la première au cours d'évolution du ST : par exemple, dans le pistolet à injection, il n'y a plus d'aiguille.

Exemple : la lampe de bureau.

Qu'est-ce qui est OT dans une lampe ? Tout d'abord, définissons la FUP : éclairer la surface de travail d'une table.

Qu'est-ce qui remplit la FUP ? – la lumière, le rayonnement optique du filament.

Où l'énergie est-elle conduite ? – vers le filament et ensuite vers la lumière (vers le champ électromagnétique de la partie visible du spectre).

Par conséquent, l'OT est la lumière (champ électromagnétique).

Le filament est la Tr et le Mtr (il transforme le courant électrique en énergie thermique, puis en énergie de rayonnement).

L'objet est la surface d'une table. L'abat-jour est une partie de l'organe de travail – il canalise le flux de la lumière.

Exemple : le chauffage d'appoint.

Quelle est la FUP de ce système ? Réchauffer l'air ?

Non. La FUP consiste à produire de la chaleur (le champ thermique est l'OT).

La première loi est élémentaire et évidente. Tout ST doit avoir quatre parties, toutes les parties doivent être opérationnelles et au moins une partie parmi elles doit être facile à contrôler. Cependant, lors de la conception et de l'amélioration des ST, cette loi n'est bien souvent pas appliquée.

Malheureusement, il est permis de transgresser les lois de la technique à la différence des lois physiques impossibles à violer même si on le voulait, ou des lois juridiques dont l'infraction est punie.

4.4. LIBRE PASSAGE DE L'ÉNERGIE²³

4.4.1. Formulation de la loi et principales règles de sa mise en application

Deuxième loi : *Le libre passage de l'énergie à travers toutes les parties du système est une condition indispensable à sa survie.*

Propriété de la loi 2 : *pour qu'une partie d'un système soit contrôlable il est indispensable d'assurer un libre passage de l'énergie entre ladite partie et son organe de commande.*

Tout système technique est à la fois conducteur et convertisseur d'énergie. Si l'énergie ne traverse pas l'ensemble du système, autrement dit, si elle reste bloquée quelque part, une des parties manquera d'énergie et, par conséquent, ne fonctionnera pas. L'énergie amenée de l'extérieur ou produite par l'élément moteur assure le fonctionnement du ST (et donc de toutes ses parties), la compensation des pertes, le contrôle des paramètres de fonctionnement des parties du système et de l'objet sur lequel il agit. Ainsi, il faut toujours chercher à faire en sorte que le ST soit non seulement un bon conducteur d'énergie, mais qu'il compense également des pertes d'énergie minimales (c'est-à-dire des pertes lors de la transformation, des déchets inutiles, une énergie emportée par l'objet).

La transmission de l'énergie d'une partie à une autre peut être *matérielle* (un arbre, un pignon, un choc), *occasionnée par un champ* (un champ magnétique, un courant électrique) ou *une combinaison des deux* (par exemple un flux de particules chargées). Un grand nombre de problèmes se réduit à sélectionner un champ et un type de transmission efficaces dans des conditions données. Pour cela, il existe trois règles auxquelles il faut se conformer :

1. *Lors de la synthèse d'un ST, il faut chercher à utiliser un seul champ (une seule forme d'énergie) pour tous les processus de fonctionnement et de contrôle dans le système.*

Lors de l'évolution d'un ST tous les nouveaux sous-systèmes doivent fonctionner avec l'énergie qui passe par le système ou avec une énergie gratuite (l'énergie de l'environnement ou une énergie sous forme de déchets d'un autre système).

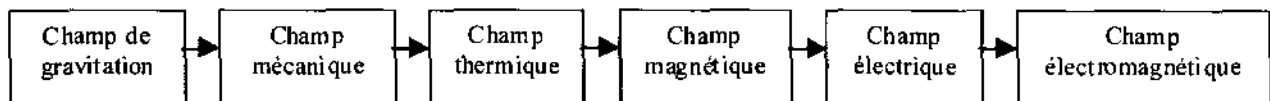
Par exemple, un procédé élaboré au Japon utilise l'énergie aéraulique pour chauffer des serres (*La connaissance est notre force*²⁴, 1988, № 3, p. 91) et prévoit

²³ Revue par Denis Cavallucci et par Nathalie Gartiser, 2001-2002

²⁴ *Знание-сила*, 1988, № 3, с.91

la transformation de cette énergie en chaleur sans passer par un stade intermédiaire d'obtention d'énergie électrique (le vent tourne la roue d'un compresseur qui comprime l'air et par conséquent le réchauffe jusqu'à 170 °C). Une telle transformation directe d'énergie a abouti à des résultats sensationnels : le procédé a vu son efficacité accrue d'un facteur 6 par rapport à la méthode précédente utilisant l'électricité.

2. Si le ST est composé de matériaux qui ne doivent pas être modifiés, on utilise le champ que ces matériaux conduisent le mieux.
3. S'il est possible de modifier les matériaux des parties du système, on remplace un champ difficilement contrôlable par un champ facilement contrôlable selon le schéma suivant :



Le réflexe est alors de remplacer les matériaux ou d'introduire des additifs qui assurent une bonne conductibilité énergétique (les matériaux doivent être "transparents" pour le champ choisi).

La recherche des combinaisons de champs et de substances les plus efficaces, la transition vers des champs facilement contrôlables et la sélection de substances réceptives à ces champs sont confuses dans l'innovation utilisant la méthode d'essais et d'erreurs. Cependant les solutions techniques les plus avancées (celles qui accroissent l'idéalité d'un système) se situent toujours à la fin de ce schéma.

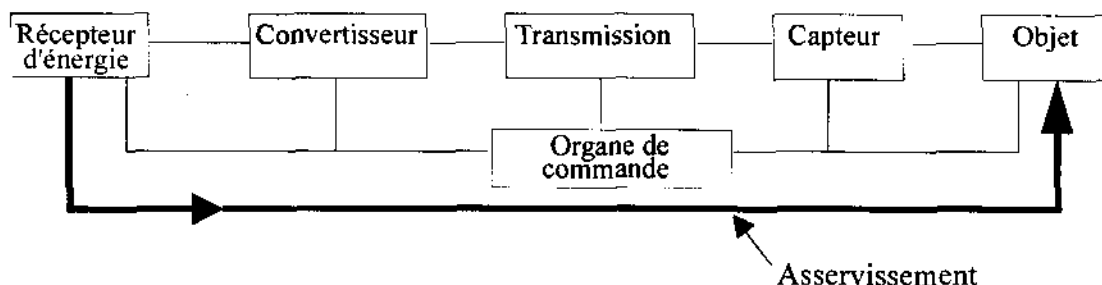
Voici quelques innovations d'une décennie (les années 1970) concernant le mécanisme de mise en place des pieux de fondation (plus particulièrement les moyens de transmission de l'effort appliqué au système "masse – tête de pieu" :

- brevet № 258 123 – transmission hydraulique ;
- brevet № 607 885 – transmission pneumatique ;
- brevets №№ 633 981, 647 405 – transmission électromagnétique (accroissement de la vitesse de la masse à l'intérieur d'un solénoïde) ;
- brevet № 247 718 – frappe hydroélectrique (application de l'effet de Yutkin [cf. *Effet électrohydraulique de Yutkin*. Annexes. Explications]) ;
- brevet № 246 396 – une masse électromagnétique est remplie par un matériau amagnétique en vue d'augmenter sa masse ;
- brevet № 390 231 – la couche superficielle de la tête d'un pieu en béton s'imprègne d'un électrolyte, le béton devient alors conducteur et au lieu de la masse, le pieu accroît sa vitesse.

En technologie, tous les problèmes d'innovation sont répartis en deux groupes : *les problèmes de modification des ST (synthèse, croissance) et les problèmes de mesure des ST (détection, contrôle de paramètres)*.

Dans les *problèmes de modification*, l'énergie se propage toujours grâce à la transmission de la source d'énergie (moteur) vers l'organe de travail, puis vers l'objet. Dans les *problèmes de mesure*, au contraire, il faut "saisir" l'information (c'est-à-dire l'énergie ou le changement d'énergie) provenant de "l'objet", autrement dit, de la partie d'un ST ou de n'importe quel processus mesuré (détecté, contrôlé) dans la nature et la technique. Ainsi,

l'énergie se dirige de l'Objet vers le Capteur (et non vers l'organe de travail), puis passe de la Transmission vers le Convertisseur (et non vers le moteur) et enfin vers le Récepteur d'énergie (et non vers la Source d'énergie). En tant que Récepteur, on utilise habituellement un appareil de signalisation, c'est-à-dire un détecteur, ou un organe exécutif.



Dans le cas de l'apparition d'un *asservissement*, l'organe de commande est éliminé de ce ST et passe au niveau de commande suivant.

Dans de nombreux cas, l'énergie captée par le détecteur est amenée à un objet du même ST. Elle traverse l'objet, le "radiographie", se réfléchit et génère l'apparition d'une énergie d'un autre type ou de nature différente. C'est pourquoi le système joue ici un double rôle : il exerce sur l'objet une action et un contrôle. Un tel ensemble de mesure peut se composer de deux systèmes ou bien d'un seul système remplissant les deux fonctions.

L'ordre des questions permettant d'appliquer cette loi lors de la résolution de problèmes d'innovation est le suivant :

- Est-ce que l'énergie passe librement à travers le ST ?
- Est-ce que la conductibilité entre les parties du ST et son organe de commande est bonne ?
- Quel est le champ que les substances du ST conduisent le mieux ?
- Est-ce qu'il est possible d'utiliser un champ mieux contrôlable ?
- Quel champ (disponible ou gratuit) vaut-il mieux utiliser pour le nouveau sous-système ?

Deux questions additionnelles concernent les problèmes de mesure :

- Quelle est l'énergie la plus facile à conduire jusqu'à l'Objet ?
- Quelle est l'énergie la plus facile à évacuer et à transmettre au Récepteur d'énergie ?

4.4.2. Particularités de mise en application de la loi lors de la résolution de problèmes d'innovation.

PROBLÈME 1. Lors de l'utilisation importante de robots, les mouvements non-maîtrisés engendrant des actes imprévus susceptibles de générer des situations de panne sont de plus en plus fréquents. Leur cause est due aux mauvais signaux provenant des détecteurs ainsi qu'aux pannes imprévues dans les parties commandes des robots. Admettons qu'un opérateur remarque un risque de panne. Comment, dans de telles conditions, et en respectant les distances de sécurité, agir sur le robot, autrement dit, l'arrêter instantanément, modifier sa programmation ou encore le déconnecter ?

Résolvons ce problème en adéquation avec la loi de conductibilité énergétique. Est-ce qu'il existe une bonne conductibilité énergétique entre les parties du ST (robot) et l'organe de commande (homme) ? Non, le problème consiste donc précisément à savoir comment contrôler efficacement le robot à distance (c'est-à-dire le déconnecter).

L'ensemble des manipulations mécaniques (interrupteurs, boutons, etc.) ne sont pas acceptables car elles exigent trop de temps. Il faut un lien instantané. Dans ce cas, le champ électromagnétique agissant à distance est le seul à pouvoir convenir. L'opérateur dispose d'un micro-émetteur muni d'une source lumineuse – une diode électroluminescente (petite lumière rouge). Il suffit alors de presser un bouton et un signal codé déconnectera le robot ou lui donnera un ordre précis. Cependant un autre problème apparaît : comment atteindre la "fenêtre" de réception du robot avec précision et rapidité avec ce rayon lumineux ? Une solution très ingénieuse a été trouvée, le micro-émetteur est intégré dans les lunettes de l'opérateur et pour viser, il suffit de regarder le robot et ainsi utiliser la précision de visée des yeux.

Dans la même logique de réflexion, tentons de résoudre le problème suivant :

PROBLÈME 2. L'efficacité d'intervention des ambulances et des voitures de pompiers se joue parfois à la seconde près. Si les feux de signalisation sont rouges, les véhicules de secours perdent un temps précieux ou créent une situation dangereuse en traversant le croisement. Que faire ?

Sur les radiateurs de ces voitures, on installe un phare supplémentaire qui émet des rayons infrarouges. Après avoir capté le signal de la voiture, un détecteur placé sur le feu tricolore allumera le vert ou retardera son passage au rouge au cas où il serait déjà allumé, jusqu'à ce que le véhicule passe le croisement. Ce phare fonctionne dans un rayon de 500 m.

Un système qui relève les informations des compteurs d'électricité, d'eau et de gaz par un simple passage en voiture dans la rue a été essayé aux Etats-Unis. Les compteurs sont munis d'un émetteur-récepteur de faible puissance qui diffuse, en réponse au signal d'un véhicule passant dans la rue, des informations codées sur les données du compteur et le numéro du consommateur. Un ordinateur installé à bord du minicar enregistre ces données. Durant une journée de travail, il est possible de relever ainsi les informations de 24 mille compteurs. C'est 80 fois plus rapide et 2 à 3 fois moins cher que le relevé des données par des agents (*Science et vie*²⁵, 1998, №6, p. 68).

Une des avancées les plus remarquables a été le procédé de marquage individuel de pièces électroniques produites en série (Institut de la physique et de la chimie minérale de l'Académie des Sciences de RSSB²⁶). La production automatisée de pièces électroniques s'effectue à grande vitesse. En revanche, dans l'étape de marquage, il y a un ralentissement. Pas une seule des installations connues n'arrive à suivre un tel rythme. Le procédé proposé (*Progrès scientifique et technique : problèmes et solutions*²⁷, 1988, №21, p. 2) consiste à utiliser un laser infrarouge de faible puissance fonctionnant par courtes impulsions et un polymère d'une photosensibilité élevée afin d'obtenir une image nette et durable. Au cours de la fabrication d'une pièce, ses paramètres sont mesurés (il n'existe pas de pièces rigoureusement identiques) puis elle est marquée immédiatement (le contrôle du laser s'effectue par microprocesseur).

²⁵ *Наука и жизнь*, 1988, № 6, с.68

²⁶ [NDT] : Acronyme russe de République Soviétique Socialiste de Biélorussie

²⁷ *НТР: проблемы и решения*, 1978, № 21, с.2

Autre situation : des capteurs de rayonnement infrarouge situés devant les portes d'un ascenseur détectent le rayonnement thermique des passagers. Ces données passent par un ordinateur qui envoie prioritairement l'ascenseur à l'étage où il y a le plus de personnes en attente. Ici, une ressource gratuite a été utilisée : le rayonnement thermique des personnes. Les résultats donnent une efficacité d'exploitation de l'ascenseur en augmentation de 20 % (*Chimie et vie*²⁸, 1984, №9, p. 23).

Le brevet № 1 004 127 présente un procédé de soudage de films thermoplastiques par rayonnement infrarouge. Pour augmenter la vitesse de soudage et la qualité du joint, on dépose avant le soudage sur le film une couche photosensible dont les dimensions et la configuration correspondent au joint à souder.

PROBLÈME 3. Il n'est pas raisonnable de chauffer de grands locaux (entrepôts, hangars, etc.) en hiver, car ils sont rarement utilisés par les hommes et le froid ne détériore pas les pièces et les machines qui y sont stockées. Cependant les hommes sont quelquefois amenés à y travailler assez longtemps et à effectuer, par ailleurs, des opérations nécessitant des mouvements brefs et précis. Des vêtements chauds gênent les mouvements et il est impossible de les enlever à cause du froid. Que faire ?

L'idée de munir l'homme d'un chauffage individuel (une spirale cousue dans un vêtement de travail en tissu fin) est née depuis longtemps et demeure plus avantageuse que de chauffer tout le local. Toutefois, être connecté à une source de courant électrique ou la porter sur soi est extrêmement inconfortable. L'idéal serait une solution permettant de traiter "l'objet" (l'homme) à distance. L'énergie doit atteindre l'homme à travers l'air sans pertes (sans chauffer l'air et d'autres objets). Quel champ traverse l'air sans pertes ? Le champ électromagnétique. Il est possible d'utiliser des rayons infrarouges (échauffement IR) ou des ondes de haute fréquence (échauffement HF). Par exemple, aux Etats-Unis, on a récemment effectué des recherches sur l'échauffement de l'homme par rayonnement à hautes fréquences avec une longueur d'ondes égale à 1 cm. Les molécules d'eau de la couche sous-cutanée absorbent le rayonnement et les sensations de chaleur sont les mêmes que d'habitude. Pour chauffer un appartement il suffit uniquement de 60 Watt, autrement dit, d'une énergie consommée par une ampoule. Cette idée a été décrite par A. Béliiaïev dans une nouvelle de science-fiction "*Inventions du professeur Wagner*²⁹" (1928).

Il est possible d'utiliser ce procédé dans un autre but : par exemple, en ex-RFA on produisait un système d'irradiation IR pour protéger des locaux (cantines, boulangeries, etc.) des mouches et autres insectes. Le rayonnement est inoffensif pour l'homme, mais détruit tout insecte sur une surface de 250 m².

Il existe également un fer à repasser à échauffement IR (brevet № 538 074) : la paroi intérieure du fer est couverte d'un revêtement qui réfléchit la lumière, la semelle étant transparente. Le fer est utilisable dès le branchement.

La même idée est utilisée dans la conception d'un fer à souder chauffant par radiation (brevets №№ 1 081 605, 1 227 928). Il est capable de chauffer, pour une soudure ou pour un recuit, la platine sans la toucher : il chauffe une surface d'un diamètre de 5 à 15 mm jusqu'à une température de 1 300 °C.

En Angleterre, une serre a été conçue dans laquelle les micro-ondes chauffent non pas l'air, mais directement les plantes. Ce procédé est dix fois moins cher que la combustion de produits pétroliers. Il a cependant fallu modifier la conception du vitrage : pendant l'hiver les

²⁸ *Химия и жизнь*, 1984, № 9, с.23

²⁹ А. Беляев. Изобретения профессора Вагнера. 1928

vitres se ferment par des rideaux plastiques couverts d'une fine couche de métal (bronze, zinc) en vue de refléter les micro-ondes à l'intérieur de la serre et de laisser passer la lumière solaire (*Inventeur et innovateur*³⁰, 1987, № 12, p. 19). Un chauffage micro-ondes de faible puissance est également utilisé pour chauffer des hangars d'élevage de volaille (*Chimie et vie*³¹, 1988, № 9, p. 127).

Il existe d'autres combinaisons de champs (électriques et magnétiques) possédant également une certaine action énergétique distante. Par exemple, il est possible d'utiliser efficacement des courants d'induction et des forces électrodynamiques.

PROBLÈME 4. Pour obtenir des échantillons d'alliages de grande pureté à base de matériaux à point de fusion élevé (tungstène, carbure de titane, de zirconium, de niobium et de tungstène) de l'ordre de 3 000 à 4 000 °C, les procédés de fusion courants ne conviennent pas. Tout creuset utilisé à cette température contaminera l'alliage. Que faire ?

Etant donné que des creusets appropriés n'existent pas, les scientifiques ont tout simplement renoncé à cette idée (A. Foguel, V. Smirnov, V. Fiodorov. *Obtention de températures élevées lors de la fusion de métaux suspendus dans une atmosphère de gaz inerte*³². "Izvestia Académie des Science de l'URSS, Métaux", 1975, № 9). Dans leur installation, une goutte de métal en fusion plane sans rien toucher au-dessus d'un inducteur à haute fréquence : les courants de Foucault non seulement la chauffent, mais aussi ne la laissent pas tomber (selon la loi de Lenz, les courants induits tendent à s'opposer à toute variation du flux magnétique).

Ce phénomène de lévitation dans le champ d'un inducteur peut évidemment concerner non seulement une goutte de métal en fusion, mais également tout autre matériau conducteur. En modifiant l'intensité, la fréquence, la pression et d'autres paramètres d'un champ magnétique alternatif, il est possible de déplacer une pièce dans la limite d'un certain espace où agit le champ de l'inducteur. En revanche, si la pièce n'a plus de place pour se déplacer, elle se déformera sous l'action de forces électrodynamiques (deux conducteurs avec des courants opposés se repoussent).

PROBLÈME 5. Pour fermer des bouteilles, on utilise des capsules en aluminium qui sont resserrées autour du goulot au moyen de rouleaux en acier. Les rouleaux (de 3 à 6) sont intégrés dans une tête spéciale constituée de quarante pièces dont l'assemblage nécessite une précision équivalente à celle d'un mécanisme d'horlogerie. Le temps de fermeture d'une bouteille par ce mécanisme est environ de 2 secondes. Le verre subit des pressions considérables, une partie des récipients ne résistent pas, la bague du goulot s'effrite. De ce fait, on fabrique des bouteilles lourdes avec des parois épaisses, ce qui augmente le coût du transport. Un autre type de défaut très répandu est une herméticité insuffisante des capsules. Proposons l'idée d'un nouveau procédé de fermeture des bouteilles à l'aide de ces mêmes capsules. Le procédé doit assurer une productivité 100 à 1 000 fois plus élevée qu'auparavant et ne doit pas casser le verre malgré des variations considérables de dimensions géométriques du goulot et des irrégularités de surface. Quelle proposition pouvons-nous formuler ?

³⁰ *Изобретатель и рационализатор*, 1987, № 12, с.19

³¹ *Химия и жизнь*, 1988, № 9, с.127

³² А.Фогель, В.Смирнов, В.Федоров. *Получение высоких температур при плавке металлов во взвешенном состоянии в атмосфере инертного газа*. "Известия АН СССР, металлы", 1975, № 9

En 1924, P.L. Kapitza a déjà étudié les propriétés des champs magnétiques intenses et a eu l'idée d'utiliser industriellement des forces électrodynamiques pour déformer des pièces métalliques. Depuis les années 60, ce procédé est mis en œuvre dans l'industrie aéronautique et automobile.

Brevets №№ 455 066, 848 466 : un appareil de formage ne contenant pas de parties mobiles est destiné à encapsuler des bouteilles en utilisant l'énergie magnétique. Sa précision tout comme l'exactitude de la mise en forme des pièces est comparable à celle du formage statique à gaz et sa vitesse de fermeture d'une bouteille est de 0,0001 seconde. (*Inventeur et innovateur*³³, 1983, № 7, p. 15).

Il existe également un procédé de séparation électrodynamique de déchets solides usuels destiné à extraire les déchets des métaux non ferreux. La technologie prévoit l'arrivée du mélange initial dans la zone opératoire, ainsi que l'action d'un champ magnétique mobile sur le mélange et le déchargement des produits de séparation. Pour une extraction des particules métalliques plus complète, on agit par un champ magnétique dans des directions opposées, sur un plan perpendiculaire à celui de l'avancement du mélange initial (brevet № 934 600).

Dans tout système, une conductibilité élevée doit aussi exister au niveau des déchets énergétiques. Par exemple la chaleur due à la friction doit être évacuée rapidement pour prévenir toute surchauffe.

Un groupe de détenus soviétiques et d'antifascistes travaillant pendant la guerre à l'usine de la société "Daimler-Benz" a ingénieusement appliqué cette idée, mais à des fins directement opposées. L'usine fabriquait des moteurs dont une partie a été programmée pour tomber en panne au bout d'un certain temps de fonctionnement. Aucune des personnes chargées du contrôle technique n'est parvenue à établir la vraie cause de ces pannes et les saboteurs sont restés dans l'anonymat. Le défaut introduit dans l'usine concernait l'admission d'huile vers le coussinet de la bielle d'un des pistons. Elle s'arrêtait après un certain temps de fonctionnement du moteur, le coussinet surchauffait et la bielle et son piston rompaient.

Voici deux problèmes de mesurage avec utilisation de champs gratuits ou présents dans le ST.

PROBLÈME 6. Proposer l'idée d'un appareil aussi simple que possible destiné à pronostiquer l'arrivée des ouragans, des tempêtes, des cyclones.

De toute évidence, il faut utiliser un champ qui provient du centre de l'ouragan. Lequel ? A.S. Popov a répondu à cette question : son appareil à détecter les orages enregistrait avec succès les décharges électriques de l'atmosphère. Ce même principe est utilisé dans un appareil conçu par l'Institut de physique de la Terre de l'Académie des Sciences d'URSS. Un fil de fer (jouant le rôle d'une antenne) capte le rayonnement électromagnétique formé lors de la naissance de forts tourbillons atmosphériques et le courant électrique induit fait retentir une sonnerie. Extraordinairement simple, l'ouragan déclenche l'alarme de lui-même en nous avertissant de son approche.

PROBLÈME 7. Des installations énergétiques importantes sont entourées par un réseau astucieux de tubes et de tuyaux dont l'herméticité est périodiquement contrôlée. Pour en effectuer le contrôle, on fait passer de l'hélium dans les tuyaux et on vérifie chaque joint de soudure, chaque raccord à l'aide d'un capteur muni d'un appareil spécial analysant le gaz. La méthode en question exige beaucoup de temps et est

³³ *Изобретатель и рационализатор*, 1983, № 7, с. 15

inefficace : elle oblige à vérifier tous les endroits au hasard en cherchant des fuites d'hélium. Par ailleurs, l'hélium est un gaz coûteux, conservé dans des récipients volumineux qui doivent être déplacés. Il serait préférable d'utiliser l'air, mais comment déterminer l'endroit exact d'où il s'échappe s'il se trouve également tout autour.

Le problème contient une grande inertie psychologique : puisqu'il faut détecter l'hélium, il faudrait trouver un moyen astucieux de détecter l'air. Alors qu'il est plus simple d'utiliser un champ gratuit se produisant lorsque l'air s'échappe de micro-fissures, autrement dit, un champ sonore (sifflement). Dans le brevet № 1 201 704, on propose de détecter l'endroit de fuite à l'aide d'un micro placé au bout d'une longue perche. Le sifflement est parfaitement perçu dans les écouteurs et le poids de l'appareil atteint uniquement quelques centaines de grammes. L'appareil élaboré en ex-RFA (*Jeune technicien*³⁴, 1986, №10, p. 33) et destiné à déterminer des zones de fuite d'eau dans un réseau urbain de canalisation est basé sur le même principe.

4.5. CONCORDANCE DU RYTHME DES PARTIES

4.5.1. Formulation et notions principales

Troisième loi : la concordance (ou la discordance intentionnelle) de la fréquence des oscillations (ou de la périodicité de fonctionnement) de toutes les parties d'un système technique est une condition indispensable à sa survie.

Les systèmes fonctionnant correctement sont des systèmes dans lesquels un type de vibrations est sélectionné de manière à ce que ses parties ne se contrarient pas et remplissent au mieux la fonction utile. Ils sont, par voie de conséquence, opérationnels.

On distingue deux types de vibrations : *propres* et *forcées*. En d'autres termes, certains systèmes peuvent osciller *comme ils l'entendent* et d'autres seront contraints à osciller par l'action d'une force extérieure. La fréquence des vibrations propres est une propriété indissociable de tout système. Elle dépend uniquement des caractéristiques de l'objet même. Dans des systèmes mécaniques, par exemple, elle dépend de la taille, la masse et l'élasticité des parties. Dans des systèmes électriques, ce sont la capacité et l'induction qui la déterminent. Cependant, le plus intéressant commence quand la fréquence des actions d'un effort extérieur (de champ) coïncide avec la fréquence propre des vibrations ; c'est le phénomène de résonance.

La résonance peut être à la fois utile et nuisible. Par conséquent, pour améliorer le fonctionnement d'un système il faut soit accorder les vibrations des parties soit, au contraire, les désaccorder. L'utilisation de la résonance (ou la prévention de son apparition) est une méthode extrêmement efficace. On améliore ainsi le fonctionnement d'un ST par une simple modification des éléments (dimensions, masse, fréquence). Il n'est pas indispensable d'introduire dans le système quelque chose de nouveau. Toutefois, cette loi n'est que très rarement appliquée. Il existe de nombreuses solutions techniques dans lesquelles les rythmes ne sont pas accordés ou d'autres où ils sont accordés en engendrant une combinaison néfaste. C'est pourquoi une grande classe de problèmes est liée à la nécessité de rétablir "l'ordre logique" dans ces systèmes qui vibrent de façon incorrecte.

³⁴ *Юный техник*, 1986, № 10, с.33

PROBLÈME 8. Les scies circulaires produisent une quantité importante de bruit lors de leur fonctionnement. A tel point qu'il est recommandé de porter des casques antibruit spéciaux. On a tenté de résoudre le problème dans le brevet N° 519 320 : pour éliminer le grincement, on a proposé de serrer la lame des deux côtés à l'aide de goujons à ressort en intercalant une bille. C'est l'exemple type d'une contradiction technique (CT) irrésolue : pour amortir complètement les oscillations d'un disque en rotation, il faut le serrer le plus fortement possible dans un étau, en revanche, pour qu'un disque tourne librement il faut enlever les goujons. Par ailleurs, les billes et les ressorts sont vite obstrués par la poussière et les copeaux, et cessent de fonctionner. Que faire ?

De ce problème, découlent quelques règles.

1. *Dans des systèmes techniques, l'action d'un champ doit être accordée (ou désaccordée) avec la fréquence propre de l'objet (ou de l'outil).*
2. *Dans des ST, les fréquences des champs utilisés doivent être accordées (ou désaccordées).*
3. *Si deux actions (par exemple, le mesurage et la modification) ne sont pas compatibles, alors on réalise une action dans les moments de pause d'une autre action. Toutes les pauses d'une action doivent être remplies par une autre action utile.*
4. *S'il faut mesurer les paramètres d'un système, dont le changement influe sur la fréquence propre des vibrations, on accorde (ou désaccorde) la fréquence propre du système avec l'action d'un champ extérieur et on évalue le changement des paramètres contrôlés selon l'apparition de la résonance.*

Considérons en détail certaines particularités d'application de ces règles à des situations d'innovation concrètes.

4.5.2. Utilisation de la résonance – concordance de la fréquence de l'action (du champ) extérieure avec la fréquence propre du système ou de son élément.

Les vibrations des objets atteignent leur amplitude maximale lorsque leurs fréquences coïncident précisément. De plus, à l'extérieur, on dépense un minimum d'énergie pour maintenir la résonance, alors qu'un maximum de cette énergie arrive à l'intérieur du système.

Afin d'illustrer cette loi, présentons quelques exemples de brevets.

Brevet N° 1 279 559 : une cueilleuse de coton pneumatique qui souffle de l'air par impulsion (la fréquence de pulsation est égale à la fréquence propre des filaments de coton) et le coton détaché est instantanément aspiré par un tuyau.

Brevet N° 1 050 635 : pour une dilution rapide d'un lait en poudre dans de l'eau, on agit sur le mélange par une fréquence qui dépend du degré de dispersion de la poudre.

Brevet N° 1 065 025 : Un procédé hydraulique de mesure de la masse de particules solides selon leur grandeur permet de les classifier en les plaçant en suspension dans un système liquide et en les séparant sous l'action de vibrations en régime de résonance. La particularité de ce brevet est que, pour accroître la précision de la mesure, la séparation s'effectue lorsque la fréquence des oscillations est égale à la fréquence propre des particules de classe marginale.

Brevet № 1 263 584 : Un procédé de transport d'une matière sèche comprend le dépôt d'un matériau sur un tapis actionné par des cylindres. Il comprend aussi la génération d'oscillations de résonance dans le tapis et dans les supports flexibles à rouleaux au moyen de cylindres dont la fréquence est égale à la fréquence des oscillations propres du tapis chargé et des supports. Ainsi, pour réduire les pertes d'énergie en stabilisant le processus d'oscillations dans le ruban comportant le matériau, ce procédé permet de le déposer sur le tapis en portions distinctes identiques ayant une fréquence égale à la fréquence des oscillations propres du tapis chargé et des supports.

Brevet № 856 463 : dans un procédé visant à prévenir l'inflammation spontanée de matériaux poreux élastiques, tels que la mousse de polyuréthane, le matériau est placé dans une étuve où il est nécessaire d'évacuer rapidement l'excès de gaz des alvéoles. On agit alors sur le gaz par une charge vibrant avec la fréquence d'oscillations propres du matériau. Suite à une compression et une dilatation rapide des bulles de la matière poreuse, le gaz se dégage et s'évacue.

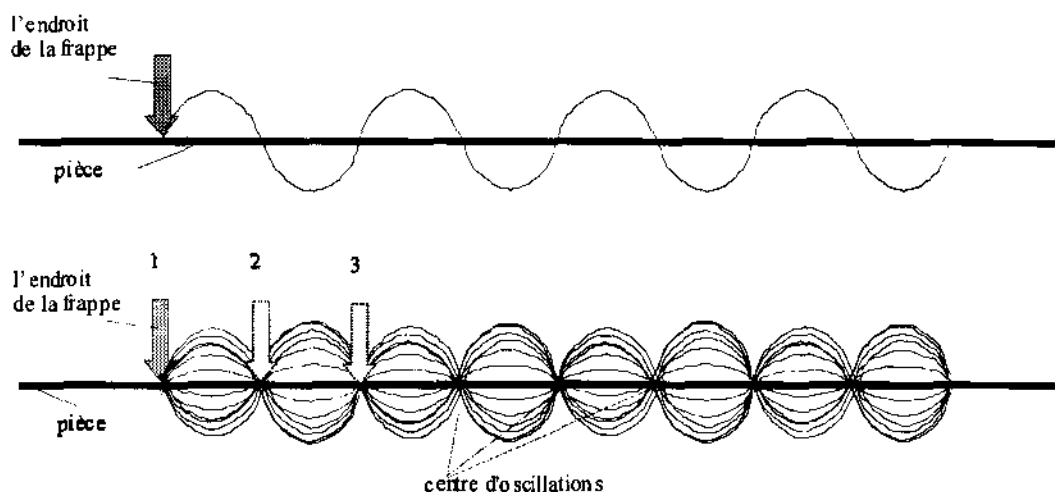
Brevet № 889 018 : un procédé d'extinction de matériaux poreux enflammés, tels que la mousse de polyuréthane ou le coke, par leur immersion rapide dans l'eau. Ces matériaux sont plus légers que l'eau et ne coulent pas. De ce fait, on agit sur les pièces par vibration du liquide avec la fréquence d'oscillations propres des morceaux flottant. Ces derniers coulent rapidement à cause d'une brusque augmentation de la pression hydrodynamique (5 à 10 fois) en régime de résonance.

Brevet № 996 347 : un procédé permettant de couper la glace en effectuant préalablement un traçage de la coupure et en transmettant ensuite à la glace des vibrations acoustiques avec une fréquence correspondant à sa fréquence propre. On propose, plutôt qu'une légère frappe risquée sur la face inverse du traçage, de réaliser cette coupure "à l'aide du son" et la glace se fendra d'elle même suivant le traçage.

Brevet № 637 597 : Un procédé d'échauffement d'un gaz par son introduction à une vitesse ultrasonique dans un container. Cette introduction provoque alternativement une compression et une dilatation du flux de gaz et génère des oscillations de résonance du container lorsqu'il se remplit et se vide. Ainsi, pour intensifier l'échauffement, le flux est introduit de façon discontinue, après chaque vidange du container, en suivant sa fréquence de résonance.

Au moment de la résonance, les parties d'un système vibrent avec une amplitude différente qui varie d'un maximum à un minimum (elle est nulle aux points de vibration). C'est pourquoi différents endroits du système subissent des tensions différentes. Ceci est utile, par exemple, pour éliminer ou répartir des tensions néfastes.

Brevet № 1 052 550 : Un procédé d'élimination de tensions résiduelles dans des pièces métalliques à contour fermé génère, dans divers points de la pièce, des vibrations à sa fréquence de résonance. Ainsi, pour éliminer uniformément des tensions résiduelles, les vibrations dans les points sont générées successivement suivant le périmètre de la pièce. Par ailleurs, chaque point successif de génération de vibration est disposé dans le centre d'oscillations du point de génération précédent.



Un procédé performant destiné à produire des micro-billes (d'un diamètre de $10\ \mu\text{m}$ jusqu'à $1\ \text{mm}$) a été élaboré à l'Institut d'Énergie de Moscou. Ce procédé consiste à extruder une matière en fusion par l'orifice d'un dispositif spécial qui vibre avec une fréquence égale à la fréquence de résonance des billes de la dimension voulue. A quelques centimètres de ce dispositif, l'amplitude des oscillations augmente et le fil de matière se disperse en gouttelettes qui se transforment instantanément en micro-billes sous l'action des forces de tension superficielle. La productivité atteint 1 million de billes par seconde ! Comment peut-on utiliser ces billes ? Il est possible de les transporter dans l'espace par faisceau laser, de les employer en stéréographie, dans le micro-alliage de grands volumes de métaux, pour un apport "ciblé" de substances médicamenteuses dans des foyers de maladie, pour faire une réserve d'hydrogène, etc. (*Industrie socialiste*³⁵, 15.06.89, p. 4).

Dans l'Université de Yales, aux États-Unis, on a mené des recherches sur l'irradiation des micro-billes de polystyrène ($10\ \mu\text{m}$) par rayonnement électromagnétique dans un diapason radio et optique. On génère dans les billes un champ électromagnétique propre au moyen de l'interaction entre le rayonnement incident et un dipôle électrique induit. Les oscillations propres les plus intenses sont observées lorsque la fréquence du champ extérieur coïncide avec les fréquences propres de tels micro-résonateurs (*Nature*³⁶, 1981, №5, p. 109).

S'il est déconseillé ou s'il n'est pas utile d'agir directement sur l'objet par une force extérieure, on introduit un résonateur lié à l'objet.

Brevet № 1 001 988 : un procédé permettant d'obtenir des systèmes dispersifs en agissant sur la substance par des vibrations en régime de turbulence. Ce procédé est réalisé par l'introduction, dans le récipient contenant la substance, d'un résonateur flexible, au moyen d'actions sur ce récipient par des oscillations ayant sa fréquence de résonance. Ainsi, pour accroître la rentabilité du processus et pour l'intensifier, on y introduit plusieurs résonateurs flexibles avec différentes fréquences d'oscillations propres.

Brevet № 119 132 : un bol vibreur est réalisé sous forme d'une rigole ou d'un tuyau le long duquel, à une distance donnée, sont disposés des vibreurs. Pour réduire la quantité de vibreurs, une partie est remplacée par des masses à ressort dont la fréquence est réglée en fonction de l'ensemble du système vibrant du transporteur.

³⁵ *Социалистическая индустрия*, 15.06.89, с.4

³⁶ *Природа*, 1981, № 5, с.109

Si la fréquence des vibrations propres de l'objet varie selon une loi inconnue, il est nécessaire d'organiser un asservissement entre l'objet et l'oscillateur (source d'un champ externe).

Brevet № 919 818 : pour améliorer la qualité d'un joint de soudure, on propose de remuer le métal dans la zone de fusion (bain fondu). Cette excitation doit être intensive et rapide. Pour ce faire, on utilise un champ magnétique externe alternatif dont la fréquence coïncide avec la fréquence des vibrations propres du bain. Cependant, les dimensions et la masse (par conséquent, la fréquence propre du bain) changent en permanence. Que faire ?

On propose d'introduire un asservissement : on capte le spectre des ondes électromagnétiques générées par le bain, ce spectre définira la fréquence du champ magnétique alternatif.

Tout objet en mouvement vibre, c'est pourquoi il est possible d'organiser ces vibrations de manière à ce qu'elles remplissent des fonctions utiles.

Par exemple, pour mélanger efficacement un gaz avec un liquide on utilise une multitude d'appareils et de dispositifs spéciaux (échangeurs de masse). Il est reconnu que des oscillations acoustiques améliorent considérablement ces processus. Malheureusement, dans un milieu gazeux et liquide, l'amortissement des oscillations acoustiques a lieu à une distance de 10 cm. Pour les maintenir, il faut créer partout dans l'appareil de nombreux centres de génération d'oscillations, néanmoins ces générateurs sont compliqués, avec une courte durée de vie et consomment beaucoup d'énergie. Les générateurs doivent être introduits pour obtenir des oscillations et ne doivent pas être introduits pour ne pas compliquer le système (en particulier, en le rendant plus coûteux). Que faire ?

De toute évidence, la fonction du générateur doit être attribuée à des éléments déjà présents dans le système avec un minimum de modifications et de compléments. Le brevet № 423 481 propose un dispositif acoustique extrêmement simple dans lequel un son est formé par le passage d'un gaz à travers les orifices d'une colonne contenant un liquide. Mais le plus important est que pour réduire les dépenses d'énergie au minimum on organise un régime de résonance. Une rondelle avec des bords fixée autour de l'orifice est utilisée en tant que résonateur – c'est elle qui crée une cavité résonante. On voit naître dans le flux, des oscillations auto-induites dont la fréquence atteint quelques milliers de Hertz. D'autres exemples d'oscillations auto-induites sont les vibrations d'air dans des sifflets, le bourdonnement des fils télégraphiques, le bruit émis par la vibration des conduites.

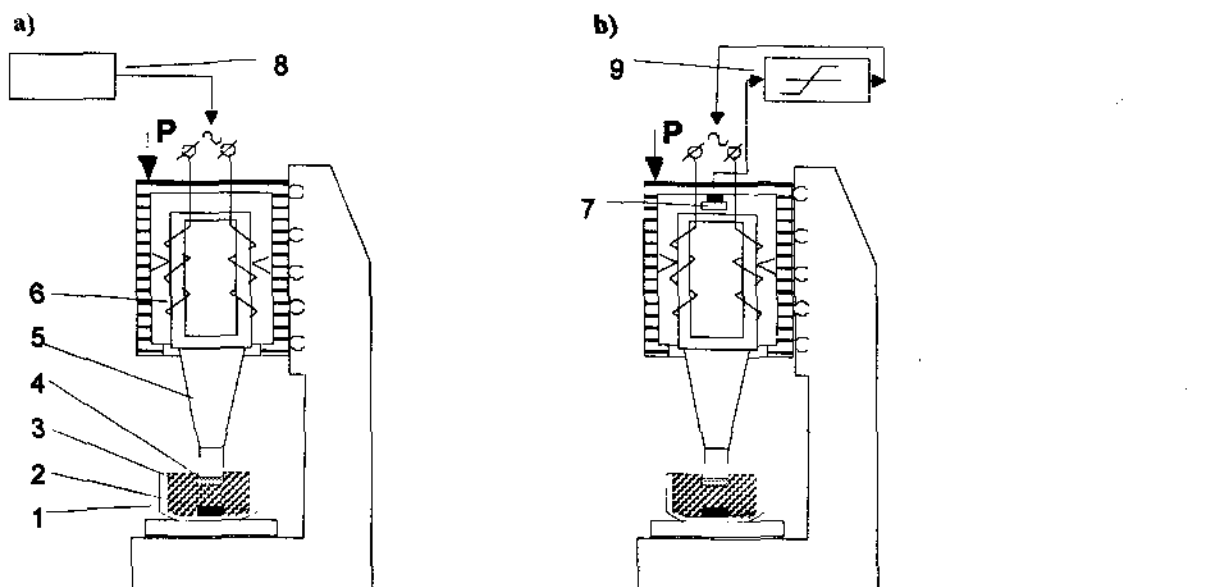
Propriété principale des oscillations auto-induites : un système vibrant contrôle lui-même l'arrivée en lui d'énergie extérieure, ce qui crée un asservissement. Autres propriétés : l'amplitude des oscillations ne dépend pas des conditions initiales car leur fréquence est proche de la fréquence propre du système vibrant. Dans ce cas, la fréquence des oscillations auto-induites est directement proportionnelle à la vitesse (masse) du flux et inversement proportionnelle aux dimensions de la cavité résonante circulaire. En modifiant les dimensions et la forme des orifices, on a réussi à utiliser la partie la plus importante du flux pour créer des oscillations auto-induites. Ainsi, la nécessité d'amener de l'énergie extérieure pour une action acoustique a disparu. La génération d'oscillations auto-induites est à la base de nombreux autres dispositifs acoustiques – brevets №№ 1 037 927, 1 057 052, 1 114 431 (*Inventeur et innovateur*³⁷, 1985, №10, p. 19).

Cependant, l'asservissement qui apparaît en régime de résonance dans un système vibrant agit dans un spectre restreint – il suffit de modifier légèrement un paramètre du

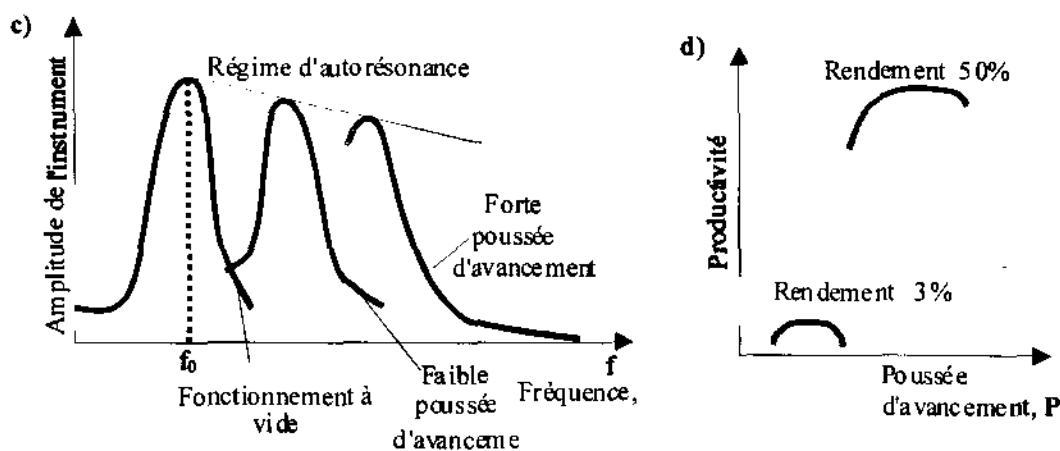
³⁷ *Изобретатель и рационализатор*, 1985, № 10, с. 19

système pour que les oscillations auto-induites disparaissent. Pour maintenir un régime durable d'auto résonance auto-adaptatif, il faut nécessairement introduire un asservissement spécifique : on installe sur l'objet vibrant un capteur dont le signal est amplifié et dirigé vers une source d'oscillations (par exemple un générateur) ; ce générateur établit à tout moment une fréquence de résonance. Ainsi, le système fonctionne en régime d'oscillations auto-induites quelles que soient les conditions de fonctionnement. De nombreuses études à l'Institut Blagonravov de l'Académie des Sciences de l'ex-URSS se sont inspirées de ce principe.

Examinons une situation, à première vue complexe, dans le domaine de l'usinage des matériaux par ultrason (fig. 10). Malgré de larges possibilités, cette technologie demeure extrêmement incertaine. Son défaut principal est que la fréquence du générateur se règle sur la fréquence des vibrations propres de l'instrument lors de son fonctionnement à vide. Dès que l'instrument se met en marche et subit diverses tensions, sa fréquence change aussitôt et ne correspond plus à la fréquence du générateur. Par conséquent, le système sort du régime de résonance et son rendement baisse brusquement.



1 – bac, 2 – objet, 3 – suspension, 4 – instrument en vibration, 5 – booster, 6 – vibreur magnétostrictif, 7 – détecteur (microphone), 8 – générateur, 9 – amplificateur. P – poussée d'avancement



a) schéma traditionnel, b) régime d'auto-résonance, c) courbes amplitude/fréquence des vibrations de l'instrument de la machine-outil

Fig. 10. Principe de fonctionnement d'une machine-outil destinée au polissage par ultrasons en régime d'auto-résonance

Le défaut des machines-outils à ultrasons est difficile à éliminer. La fréquence propre de l'instrument est influencée par les propriétés inconstantes du matériau poli, par la pression de serrage de l'instrument contre la pièce et par les conditions d'abrasion ultrasonique. Pour qu'une infime partie de l'énergie arrive à sa destination, il faut accroître excessivement la puissance des générateurs. Ceci est extrêmement inefficace et peu économique. Que faire?

L'idéal serait que le système choisisse lui-même sa fréquence de résonance la plus appropriée. Le système a besoin d'une auto-résonance !

On dispose un capteur destiné à l'asservissement – un simple microphone – derrière le générateur sur le côté opposé à la zone d'abrasion (pour ne pas gêner l'opération). Son signal est transmis par l'amplificateur sur la bobine du générateur magnétostrictif. On voit apparaître des oscillations auto-induites dont la fréquence est non seulement sensible au moindre

changement dans les conditions de fonctionnement, mais reste toujours résonante et assure une transmission efficace de l'énergie ultrasonore (*Science et vie*³⁸, 1985, №9, p. 18-25).

Le booster (5) amplifie les vibrations d'une fréquence ultrasonore générées dans le vibreur magnétostrictif (6). L'instrument en vibration (4) est poussé contre l'objet (2) par la poussée d'avancement (P). On remplit le bac (1) par une suspension abrasive (3). Le traitement s'effectue par l'effet des particules abrasives en suspension sur la surface à traiter, au moyen de coups portés par l'instrument en vibration.

On effectue un réglage de la résonance généralement pendant le fonctionnement à vide, néanmoins la machine-outil se dérègle lors de l'augmentation de la poussée (en raison des efforts de pression) et la fréquence "quitte" la zone de résonance. L'auto-résonance permet de maintenir automatiquement les conditions optimales de génération quelle que soit la valeur de poussée, sans accroître la puissance.

Pour conclure, voici quelques réflexions sur la résonance humaine. De nombreux organes du corps humain ont des fréquences de résonance assez basses : la tête de 20 à 30 Hz, l'appareil vestibulaire de 0,5 à 13 Hz, les bras de 2 à 5 Hz, alors que le cœur, la colonne vertébrale, les reins sont tous réglés sur une fréquence d'environ 6 Hz. Comment cela peut-il servir l'évolution humaine ? Le mystère reste entier. Les voies de la curiosité humaine sont impénétrables et nous assisterons inévitablement à des expériences sur l'homme de l'influence des fréquences de résonance. En France, un sifflet destiné à disperser des manifestations a été inventé. Selon un journal français, au moment des essais, les personnes ressentait une douloureuse vibration dans tout le corps dans un rayon de cinq milles (8 km). Aux Etats-Unis, on a conçu des "projecteurs" infrasonores qui créent dans l'atmosphère des ondes acoustiques susceptibles d'altérer la vue, de provoquer les nausées, la peur. Peut-être est-ce l'avènement d'un nouveau type d'arme psychotrope ? A ces fréquences, le son traverse facilement les obstacles métalliques et en béton (*Jeune technicien*³⁹, 1989, № 7, p. 8-15).

4.5.3. Concordance (discordance) des rythmes de fonctionnement des parties du système

En cours de fonctionnement ou d'interaction, les fréquences de diverses parties d'un système, en règle générale de l'outil et de l'objet, doivent être accordées pour une meilleure interaction ou bien désaccordées en vue d'éviter une interaction nuisible. En outre, il est utile de concorder (désaccorder) non seulement les fréquences propres des oscillations, mais également d'autres caractéristiques susceptibles d'influer sur la fréquence, notamment la vitesse, la masse, les dimensions, la forme, l'élasticité, etc. Dans certains cas, la notion de fréquence ne figure même pas dans les solutions.

³⁸ *Наука и жизнь*, 1985, № 9, с.8-25

³⁹ *Юный техник*, 1989, № 7, с.8-15

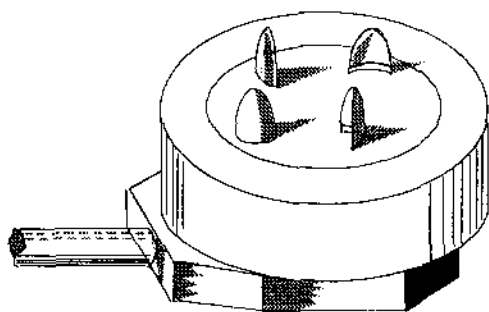


Fig. 11. Roue d'un avion selon le brevet français № 2 600 619.

Lors de l'atterrissage d'un avion, on voit apparaître un nuage de fumée. Ce nuage apparaît lors du contact des roues avec la terre. Un choc se produit et les roues se mettent en rotation en patinant, générant une usure excessive des roues. De toute évidence, les rythmes de la roue (outil) et de la piste d'atterrissage (objet) ne sont pas accordés. Selon le brevet français № 2 600 619 (fig. 11), on propose de fixer des ailettes sur les surfaces latérales des roues – ainsi le flux d'air frontal mettra les roues en rotation avant l'atterrissage.

D'autres brevets explorent la même propriété :

Brevet № 639 546 : un procédé d'action thermique locale (outil) sur des fibres nerveuses (objet) par un champ thermique modifié de façon rythmique de manière à ce que sa fréquence corresponde avec le rythme de la respiration.

Brevet № 1 163 853 : un procédé de massage des parties du corps (objet) assuré par un appareil vibratoire (outil) agissant dans le rythme des pulsations cardiaques.

Un exemple de discordance : un enfant grandit alors que ses poupées restent de la même taille. Aux Etats-Unis, on fabrique des jouets en plastique capables de grandir avec l'enfant. Il suffit de rajouter un peu d'air comprimé (*Jeune technicien*⁴⁰, 1989, № 9, p. 38).

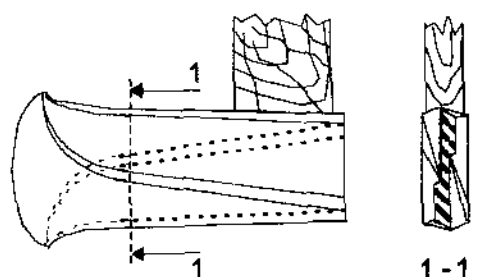


Fig. 12. Hache selon la demande de brevet international 88/00 112

L'évolution de la hache se poursuit. Dans la demande de brevet international 88/00 112, on propose une nouvelle hache. Dans cette innovation, l'interaction néfaste (coincement de la hache dans le bois) entre l'objet (le bois) et l'outil (la hache) est désaccordée. Pour cela, la partie tranchante de la hache est réalisée avec des côtés latéraux asymétriques (désaccordés) : chaque côté a une dent, ces dernières sont disposées en diagonale l'une en face de l'autre (fig. 12).

⁴⁰ *Юный техник*, 1989, № 9, с.38

4.5.4. Prévention ou neutralisation de la résonance – la discordance de la fréquence propre du système avec la fréquence de l'action extérieure ou l'organisation d'une action opposée.

Une des pages les plus tragiques dans l'histoire des catastrophes naturelles est le tremblement de terre de Mexico, en 1985. Ce tremblement de terre a été extrêmement dévastateur. Les experts américains ont démontré que les oscillations produites pendant ce tremblement ont coïncidé par hasard avec les oscillations propres du sol de plusieurs parties de la ville ainsi qu'avec les oscillations propres de nombreux bâtiments. La durée prolongée des secousses a favorisé l'augmentation des phénomènes de résonance qui sont responsables de la destruction des bâtiments (la résonance a augmenté l'effet néfaste par un facteur 6, ce qui a provoqué le dépassement de la limite de stabilité des bâtiments, y compris ceux ayant des propriétés anti-sismiques). Tout ceci indépendamment de l'ancienneté de construction des bâtiments. La raison essentielle de leur destruction dans la majorité des cas était la fréquence de leurs oscillations propres. D'où une conclusion pratique : lors de la construction de nouveaux bâtiments dans des zones sismiques il est indispensable de surveiller les oscillations propres des bâtiments afin qu'elles ne coïncident pas avec les oscillations propres du sol de façon à atténuer l'effet de résonance.

Il existe plusieurs possibilités d'élimination d'une action néfaste engendrée par la résonance :

1. *Eviter la résonance en modifiant la fréquence des oscillations propres.*
2. *Organiser la neutralisation mutuelle de deux (ou plusieurs) actions néfastes.*
3. *Introduire une nouvelle action extérieure en opposition de phase par rapport à l'action néfaste.*
4. *Auto-neutraliser l'action néfaste en la subdivisant en deux, en décalant l'une des actions en phase et en les heurtant.*
5. *Auto-neutraliser l'action néfaste en introduisant des masses supplémentaires avec des centres de gravité mobiles.*
6. *Supprimer la source de l'action extérieure.*

Analysons ces possibilités sur des exemples concrets.

Il est possible de modifier la fréquence de vibrations propres en changeant un des paramètres du système.

Brevet № 714 509 : le vent met en mouvement les câbles des lignes à haute tension et risque également de les arracher si les coups de vent se synchronisent avec les vibrations des câbles. Pour exclure les phénomènes de résonance, un des fils à l'intérieur du câble est d'un diamètre plus faible que les autres.

La scie circulaire du problème 8 grince parce que ses dents sont disposées à intervalle égale. Les chocs s'additionnent et créent de fortes vibrations de résonance. Pour éviter la résonance, il suffit de réaliser les dents de différentes tailles, disposées à distance inégale ou bien en décalage par rapport au plan de coupe initial.

Brevet № 822 925 : un tamis constitué d'un cadre avec des fils tendus se distingue par le fait que pour améliorer la qualité de tamisage, deux fils (sur un total de 7), ceux situés en 3^{ème} et 5^{ème} positions sont de 1,5 à 3 fois plus tendus que les autres.

Brevet № 1 015 150 : pour agir plus efficacement contre les vibrations, on a élaboré un amortisseur dans lequel le diamètre des orifices diminue avec la hauteur de l'élément élastique (fig. 13).

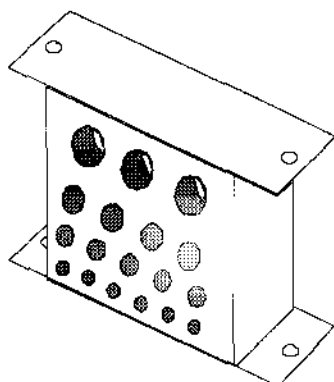


Fig. 13. Élément élastique selon le brevet № 1 015 150

Dans des conduites fonctionnant sous haute pression, on voit apparaître des vibrations de différentes fréquences (dues à la pression exercée par les pulsations) qui peuvent générer la résonance d'oscillations et par conséquent un choc de compression détruisant tout le système de conduites. Pour éviter cela, on prévoit dans ces systèmes une multitude d'amortisseurs parfois peu efficaces, notamment des éléments flexibles insérés, des suspensions élastiques, des joints à évent, des clapets de sûreté, etc. Puis, fut élaboré un dispositif universel qui prévient l'apparition de la résonance (*La connaissance est notre force*⁴¹, 1988, № 5, p. 6). Ce dispositif est constitué de deux éléments élastiques interconnectés. La rigidité de l'un change selon une loi linéaire et la rigidité de l'autre change selon une loi non linéaire. Le premier élément est un ressort hélicoïdal et le second est un élément élastique à ressort en fil métallique compacté. Ce dispositif, avec une résistance acoustique réglable, permet de contrôler le réajustement des fréquences des oscillations propres de la conduite. Il est possible également de réfléchir partiellement l'énergie des pulsations vers leur source. Ainsi au retour, une onde réfléchie amortit l'onde de même fréquence qui se propage en sens inverse.

Le moyen le plus efficace de neutraliser deux actions néfastes (extérieures ou extérieure et intérieure) est de les mettre en contact et de faire en sorte qu'elles se détruisent (parfois il faut désaccorder préalablement leur phase ou leur fréquence). Cependant, la présence simultanée de deux actions néfastes dans les systèmes est un phénomène assez rare. Le plus souvent, une deuxième action doit être introduite artificiellement.

Brevet № 1 067 147 : Procédé d'amortissement de secousses sismiques qui consiste à créer dans le sol des écrans amortissant des ondes sismiques qui se distingue par le fait que pour accroître l'efficacité d'amortissement, on forme des écrans par introduction dans le sol d'une substance perméable au magnétisme et au moment où les ondes sismiques approchent, on fait passer des impulsions de courant électrique à travers ces écrans.

Lors de la construction d'édifices géants, tels que des tours, des cheminées industrielles ou des monuments, on prévoit des mesures spéciales de sécurité afin de prévenir leur chute éventuelle. Les secousses les plus dangereuses sont les charges latérales brusques en oscillation, autrement dit le vent. L'amplitude des oscillations atteint rapidement quelques mètres et en cas de résonance, ces constructions sont détruites. Une des solutions possibles (brevet № 566 912) consiste à organiser un "contre-vent" : des souffleries envoient des flux

⁴¹ *Знание - сила*, 1988, № 5, с.6

d'air en sens inverse à celui du vent et sont disposées à intervalle régulier sur toute la hauteur de ces constructions.

Brevet № 865 534 : on propose de stabiliser une pièce déformable qui vibre lors du tournage en lui transmettant des impulsions de courant électrique.

Brevet № 589 482 : dans les fondations, on propose de neutraliser la vibration générée par le fonctionnement d'installations technologiques à l'aide d'oscillations en opposition de phase générées dans ces mêmes fondations par un système automatique spécifique.

Une solution identique a été proposée à l'Institut de construction navale de Pologne pour supprimer les vibrations nuisibles des navires, non seulement pour leurs éléments de construction, mais aussi pour la santé des marins (*Science et vie*⁴², 1983, № 7, p. 48).

La lutte contre la pollution de l'environnement par le bruit peut suivre deux voies : soit la suppression des sources de bruits, soit l'amortissement passif du bruit (des cloisons absorbant le bruit, des murs épais, une insonorisation) ou l'amortissement actif. Ce dernier moyen s'est avéré pour l'instant le plus efficace, il est largement répandu et devient de plus en plus populaire dans le monde entier.

Une des sources des bruits industriels les plus puissants et les plus nuisibles provient des stations de pompage de gaz, des bancs d'essais des moteurs à réaction, des installations de turbomachines. Par exemple, une station de gaz comprimé située aux alentours de Cambridge causait beaucoup de désagréments aux habitants des environs. Pour neutraliser les bruits à basse fréquence émanant de cette station et ce, dans toutes les directions, les scientifiques du centre de recherche de Cambridge ont disposé autour de sa cheminée 72 haut-parleurs puissants. Un dispositif électronique particulier percevait les bruits du flux de gaz, les décalait en phase de 180 ° et les transmettait avec l'amplitude requise aux haut-parleurs.

L'effet fut frappant : après la mise en marche de haut-parleurs, les ondes sonores se heurtant en opposition de phase se sont amorties et autour de la station s'est établi un silence quasi-absolu. Le système acoustique antibruit n'a aucun effet sur le moteur. Son coût est au moins deux fois plus bas que le coût des dispositifs traditionnels d'insonorisation et son efficacité plus élevée (*Nouveautés dans la vie, la science et la technique*⁴³. Série "Technique", 1983, № 2, p. 58).

Aux Etats-Unis, on utilise un dispositif fonctionnant selon le même principe pour neutraliser le bruit des moteurs diesel (*Inventeur et innovateur*⁴⁴, 1989, № 8, MI 0812).

En Grande-Bretagne, on a fabriqué un ventilateur silencieux doté d'un microphone et d'un haut-parleur intégrés : le micro capte le bruit du moteur et des pales, un bloc électronique les transforme en un son de phase opposée qui est reproduit par le haut-parleur, ainsi le bruit fut complètement neutralisé. En se basant sur ce principe, on a conçu également un "télescope acoustique" destiné à combattre le bruit dans des locaux. Cet appareil est constitué de 25 micros miniatures. Une courte impulsion émise par un haut-parleur génère un écho qui est transmis par les micros dans un dispositif de mesurage. Un micro-ordinateur enregistre et évalue l'écho en déterminant dans quelle direction le son se réfléchit avec une atténuation maximale. La fréquence et la phase de "l'anti-son" qui réagissent contre le bruit sont calculées selon les résultats des mesures prises.

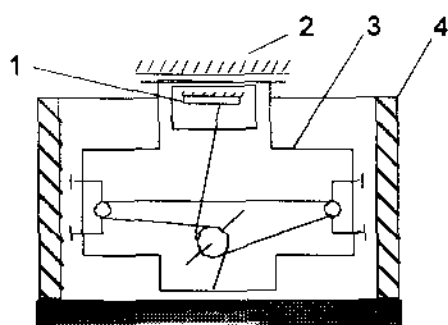
⁴² *Наука и жизнь*, 1983, № 7, с.48

⁴³ *Новое в жизни, науке, технике*. Серия "Техника", 1983, № 2, с.58

⁴⁴ *Изобретатель и рационализатор*, 1989, № 8, МИ 0812

Cependant, l'introduction dans un système d'une deuxième action nuisible en vue de détruire la première (par exemple un anti-son) exige des dispositifs supplémentaires, des sous-systèmes et de l'énergie. *Il est plus efficace et moins onéreux d'organiser une action opposée basée sur cette même force nuisible, autrement dit, diviser cette dernière en deux, décaler l'une des forces en phase (le mieux serait 180 degrés) et faire en sorte qu'elles se neutralisent.*

Lors de la reconstruction d'une filature, il a fallu installer au premier étage de nouveaux métiers à tisser qui vibrent lors de leur fonctionnement. Les dispositifs d'amortissement traditionnels n'assuraient pas l'effet requis. De ce fait, la seule solution évidente était renforcer considérablement les constructions (plancher, piliers et poutres), ce qui est coûteux et long. En outre, l'installation de l'amortisseur nécessiterait au minimum 1 mètre de surface sous le métier. La solution trouvée (brevet N° 1 392 279) a permis de disposer un amortisseur à haute efficacité directement dans le plancher. L'amortisseur (fig. 14) fonctionne avec la force néfaste de la vibration qui se neutralise d'elle-même.



1 – poutre d'appui, 2 – socle-bâti, 3 – amortisseur, 4 – plancher.

Fig. 14. Amortisseur selon le brevet N° 1 392 279.

A l'aide d'un câble-porteur dont une extrémité est attachée à la poutre d'appui (1), l'amortisseur (3) se fixe par l'autre extrémité du câble au fond du corps de l'amortisseur. La poutre d'appui traverse le corps de l'amortisseur par un orifice débouchant et s'appuie directement sur la construction du plancher (4). L'amortisseur se situe dans une cavité prévue à cet effet dans le plancher. Le socle-bâti du métier (2) est placé sur l'amortisseur.

Brevet N° 1 280 140 : dans le silencieux de l'échappement des machines à gaz (compresseurs, moteurs, etc.) le bruit est neutralisé par l'interférence des turbulences.

Pour neutraliser une action néfaste extérieure, on utilise souvent un principe qui consiste à introduire dans un système des poids supplémentaires ayant un centre de gravité mobile : par exemple, des sphères, des balanciers, des poids à ressort, des excentriques, etc.

Brevet N° 673 995 : dans un régulateur de pression afin d'amortir plus efficacement les oscillations auto-induites, le poids est réalisé avec un centre de gravité décalé par rapport à son axe longitudinal.

Sur une grue, les balancements et les vibrations de la charge engendrés par les coups de vent, l'inertie de la charge lorsque la grue tourne, les descentes et les levages saccadés du crochet (changement fréquent de la position du treuil entraîne des saccades de la charge) constituent les difficultés majeures de son fonctionnement. Ces vibrations à basse fréquence se transmettent par des câbles sur les constructions métalliques de la grue et peuvent parfois provoquer un accident. Par ailleurs, le grutier perd du temps en attendant que la charge se stabilise, surtout s'il faut la transporter dans des passages étroits.

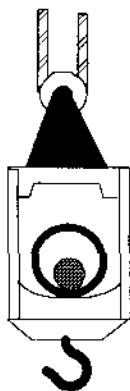


Fig. 15. Patte d'attache selon le brevet N° 895 886.

Le brevet N° 895 886 propose une patte d'attache (fig. 15) constituée d'un organe de préhension (ici c'est un crochet de manutention), d'un ensemble mécanique et d'un corps creux qui comporte deux sphères massives creuses (pour réduire la taille du mécanisme il est possible de les placer l'une dans l'autre). Le fond du corps est un creux arrondi et symétrique à l'axe vertical de la patte. Sous l'action de la vibration, les sphères se déplacent dans le creux à l'intérieur du corps en décalant ainsi le centre de gravité de la patte et en neutralisant les oscillations néfastes.

Pour les appareils aériens et les stations aérospatiales, un des problèmes complexes à résoudre était la neutralisation des vibrations du liquide contenu dans les réservoirs à essence. Une des voies d'évolution de tels systèmes passait par l'introduction dans les réservoirs de constructions élastiques à amortissement (fig. 16).

On place dans le liquide une sphère élastique remplie de gaz : les coups brusques et les mouvements du liquide font se comprimer ou se décompresser la sphère avec une fréquence différente à celle du liquide. Les oscillations du liquide se neutralisent partiellement, cependant les vibrations des parois du réservoir ne sont pas du tout amorties à cause de la réaction dynamique qui se crée dans les supports.

Brevet N° 295 922 : un amortisseur dans lequel, pour diminuer l'amplitude des vibrations des parois et pour réduire la réaction dynamique dans les points de fixation du réservoir, l'élément amortisseur est muni de liens élastiques destinés à le fixer au réservoir (fig. 16a).

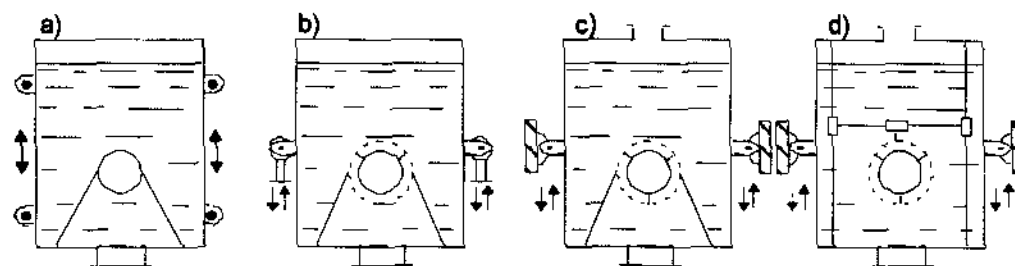
Brevet N° 485 252 : pour mieux amortir les oscillations, l'amortisseur est muni d'une enveloppe perforée autour d'une sphère élastique ; ces deux pièces sont liées entre elles par des attaches flexibles radiales (fig. 16b).

Brevet N° 543 795 : pour amortir certaines fréquences de vibrations, l'enveloppe élastique et la sphère qu'elle entoure sont séparées en secteurs au moyen de parois. Les parois des secteurs de la sphère élastique ont un degré d'élasticité différent. Ces secteurs sont remplis d'un gaz sous différentes pressions et les parois de l'enveloppe élastique ont un degré de perforation différent selon le secteur (fig. 16c).

Brevet N° 724 837 : pour augmenter l'efficacité d'amortissement des oscillations, la surface de tous les orifices de l'enveloppe perforée constitue 2 à 4 % de la superficie totale de la surface.

Brevet N° 756 104 : pour accroître l'efficacité d'amortissement des oscillations, l'amortisseur est disposé de façon à pouvoir se déplacer dans le liquide et possède une flottabilité nulle. Lors des oscillations du liquide, l'amortisseur se déplace du côté des

amplitudes les plus importantes, autrement dit, il fonctionne en régime auto-adaptatif (fig. 16d).



a) selon le brevet № 295 922, b) selon le brevet № 495 252, c) selon le brevet № 543 795, d) selon le brevet № 756 104

Fig. 16. Amortisseurs d'oscillations.

Dans les pays d'Extrême-Orient, par exemple au Japon, pendant les tremblements de terre il arrivait souvent que des bâtiments en béton armé, des ponts en acier s'effondrent, alors que des pagodes en bois restaient intactes. Ce secret se traduit en une innovation de la manière suivante : à l'intérieur de chaque pagode, les constructeurs de l'époque suspendaient une longue poutre en bois avec un poids au bout. La fréquence de ce balancier original était telle qu'au cours des tremblements de terre il oscillait en opposition de phase avec la construction en aidant ainsi à amortir les vibrations.

A New York et à Phœnix, on érige des gratte-ciel hauts de 520 mètres. La carcasse en béton armé de ces "super gratte-ciel" doit résister à la pression d'un vent soufflant à 150 km/h. Comment éviter le balancement des bâtiments ? Dans un gratte-ciel new-yorkais, on a installé au dernier étage un contrepoids glissant pesant 365 tonnes qui neutralisait la pression du vent et amortissait les oscillations du bâtiment (*Industrie socialiste*⁴⁵, 11.12.86).

Au Japon, une compagnie de construction a choisi une solution plus simple : on installe sur le toit d'un gratte-ciel un immense réservoir d'eau. Ce liquide réagit à des chocs avec un retard à cause d'une grande masse et de l'inertie. Les oscillations du bâtiment se neutralisent et sont considérablement amorties (*La technique pour les jeunes*⁴⁶, 1988, № 9, p. 42).

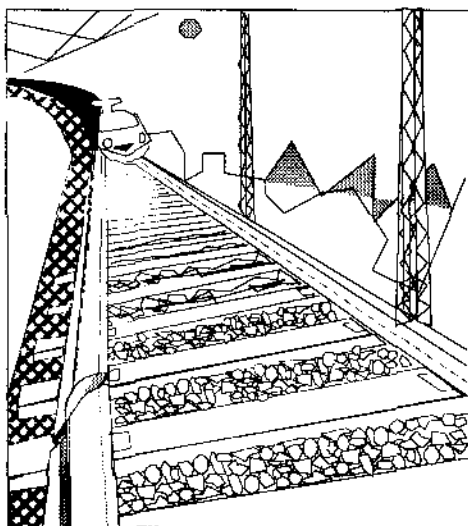
Le moyen extrême, mais très simple, de combattre la résonance consiste à *supprimer la source de l'action extérieure*.

Par exemple, pour éliminer l'action du choc exercé sur un wagon lorsque les roues passent un raccord entre deux rails, on propose (*Inventeur et innovateur*⁴⁷, 1985, № 1, p. 33) de réaliser le raccord avec un chanfrein à 45 ° par rapport à l'axe du rail. En avançant sur le début du rail suivant la roue continue à courir sur le rail précédent, elle ne rencontre pas d'écart perpendiculaire à la ligne génératrice de la roue entre les rails et passe silencieusement d'un rail à l'autre.

⁴⁵ *Социалистическая индустрия*, 11.12.86

⁴⁶ *Техника молодежи*, 1988, № 9, с.42

⁴⁷ *Изобретатель и рационализатор*, 1985, № 1, с.33



Trains silencieux

4.5.5. Phénomène de synchronisation automatique des corps en rotation : l'utile et le nuisible

La résonance est particulièrement dangereuse dans les systèmes dont plusieurs parties sont en rotation. Dans de tels systèmes, la résonance peut apparaître spontanément au moyen du phénomène de la synchronisation de corps en rotation (découverte № 333, 1987) : tous les systèmes comprenant des corps en rotation tendent vers une auto-organisation, cherchent à trouver le même rythme et à fonctionner de façon synchronisée.

Par exemple, dans une filature des pannes inexplicables ont été constatées : les machines-outils tombaient souvent en panne et se démantelaient purement et simplement en un amas de pièces détachées. L'analyse du système a démontré que la cause de ce phénomène était due à la synchronisation. Les moteurs des métiers à tisser se synchronisaient, les machines entraient en résonance et se détruisaient. La seule solution, d'ailleurs très simple, était de détruire la résonance, changer les moteurs de place, supprimer les liens superflus (*La technique pour les jeunes*⁴⁸, 1988, № 4, p. 13).

Ce phénomène a été remarqué à l'Institut "Mekhanobr"⁴⁹ en 1948. Deux moteurs électriques séparés actionnaient deux installations indépendantes placées sur un même socle. Un jour les fils électriques alimentant un des moteurs se sont rompus. Mais ce fait n'a été remarqué que quelques heures plus tard : le moteur dont le courant a été coupé continuait de tourner et semblait fonctionner tout seul en actionnant l'installation liée avec lui !

Un des problèmes les plus importants résolu par l'utilisation de l'auto-synchronisation consistait à créer des procédés hautement efficaces de concassage de matière brute minérale. Chaque année en Russie, on concasse jusqu'à 3 milliards de tonnes de matière brute minérale, ce qui nécessite plus de 5 % de l'énergie produite. Par ailleurs, la consommation d'énergie croît constamment, car les minerais sont de plus en plus pauvres et, de ce fait, il est indispensable d'augmenter leur degré de concassage. Actuellement, on utilise déjà des technologies permettant de traiter des minerais avec des micro-inclusions qui exigent un

⁴⁸ *Техника молодежи*, 1988, № 4, с.13

⁴⁹ [NDT] : Institut de traitement mécanique des minerais

concassage de particules jusqu'à environ 0,1 mm de diamètre et dans un proche avenir, la dimension des particules diminuera encore (la quantité d'énergie nécessaire pour le concassage est directement proportionnelle à la nouvelle surface formée qui, à son tour, est inversement proportionnelle au carré du diamètre d'une particule).

Comment fonctionnent les concasseurs actuels ? Ce sont d'immenses constructions – des moulins avec des tambours remplis de sphères ou de pièces cylindriques en acier qui, en se déplaçant, concassent et broient les morceaux de minéraux. Cependant, même l'acier le plus résistant s'use dans ces conditions et se transforme en poussière. En fin de compte, pour concasser une tonne de minerai, environ 1 kg de métal s'use en moyenne soit près de 3 millions de tonnes de métal par an s'usent à l'échelle du pays, c'est-à-dire environ 2 % de la quantité totale produite ! Parfois la situation devient paradoxale. Par exemple, il faut 3 milles tonnes de minerai pour obtenir 1 tonne de molybdène. Ainsi, pour obtenir une tonne de ce métal précieux utilisé comme additif d'alliage, il faut dépenser ... près de 3 tonnes d'acier allié (*Chimie et vie*⁵⁰, 1987, № 5, p. 11-17).

A "Mekhanobr", il a été proposé un nouveau procédé de concassage vibratoire (sans sphères en acier). Le procédé consiste en un auto-broyage des morceaux de minerai. Par ailleurs, ce processus se déroule de façon optimale quand les morceaux subissent une pression par impulsions avec un décalage (le morceau se désagrège suivant les défauts de la structure cristalline). L'avantage de ce procédé vibratoire est qu'il n'est pas nécessaire d'exercer de fortes charges sur les minéraux simultanément. Il suffit aisément que des pressions et des torsions de force moyenne se répètent à plusieurs reprises – l'énergie s'accumule à l'intérieure du morceau de minerai, et, à un moment donné, le minéral se désintègre en poudre d'une certaine granularité. La seule condition indispensable est le synchronisme et la cohérence de phase des actions exercées sur le matériau par des systèmes de vibration indépendants (par exemple, des générateurs d'oscillations en déséquilibre mis en rotation par des moteurs électriques). C'est là qu'on observe le phénomène d'auto-synchronisation des arbres moteurs.

4.5.6. Concordance (discordance) de la fréquence des champs utilisés

Utilisons quelques brevets pour illustrer ce phénomène.

Brevet № 698 663 : procédé de séparation de matériaux par un champ magnétique et des vibrations dans lequel on inverse la rotation du champ magnétique de façon synchronisée avec les vibrations. Ceci diminue la force de liaison entre les particules des matériaux et augmente l'efficacité de la séparation.

Procédé de damage du sol par vibrations où l'on transmet au bord avant du plateau vibrant des vibrations d'une fréquence deux fois inférieure à celle du bord arrière. Ce procédé permet de damer efficacement des sols constitués de fragments minéraux de taille importante (*Technique et science*⁵¹, 1983, № 1, p. 17).

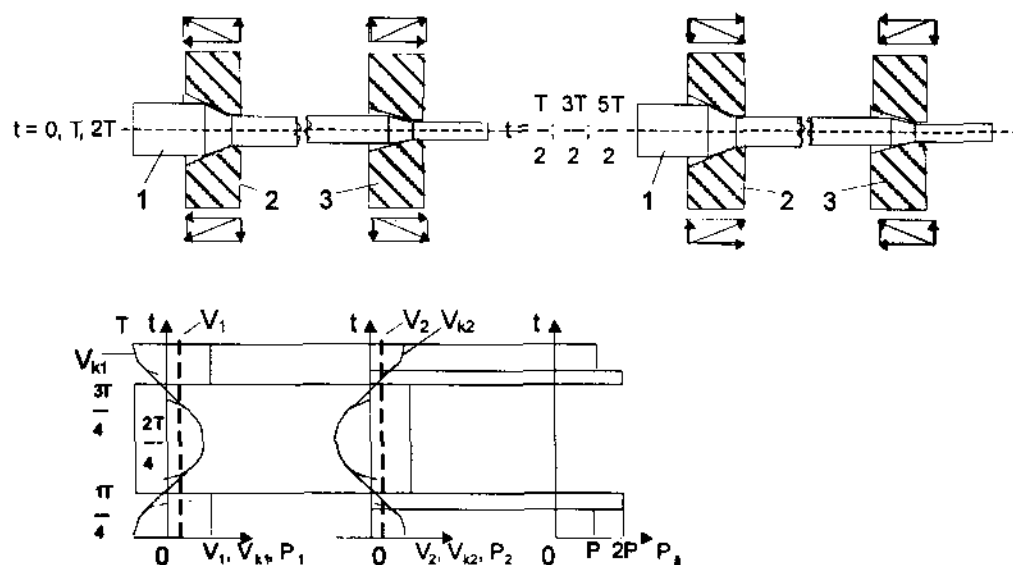
Dans les salles d'exposition, les aéroports, les halls d'hôtel, il faut transmettre différentes informations à des endroits différents à l'aide de haut-parleurs. Cependant, installer au plafond ou sur les murs des dizaines de haut-parleurs parlant différentes langues provoquerait un amalgame incompréhensible de sons. Que faire ?

⁵⁰ *Химия и жизнь*, 1987, № 5, с.11-17

⁵¹ *Техника и наука*, 1983, № 1, с.17

Au Japon, on propose de superposer les voix de présentateurs et les oscillations ultrasonores émises par les haut-parleurs. Par ailleurs, sur chaque espace sont dirigés deux haut-parleurs qui émettent deux rayons directionnels ultrasonores en opposition de phase. Ces rayons se croisent dans la zone requise de la salle en s'amortissant l'un l'autre. De ce fait, il ne reste que la voix du présentateur (*Industrie socialiste*⁵², 24.01.85).

Le brevet № 1 002 064 est un exemple d'application ingénieuse de la règle de concordance/discordance des champs utilisés. Il présente un procédé d'étirage de métal à travers deux filières avec l'utilisation d'ultrason. Dans cet exemple, l'effort d'étirage est considérablement réduit grâce au fait qu'une filière pousse le métal à travers l'autre.



métal à travers la filière (3). L'effort de poussé de la filière (2) est actif et diminue l'effort total d'étirage au travers des deux filières. Simultanément, la filière (3), en diminuant son diamètre et en se déplaçant en direction opposée d'étirage, déforme le métal. On observe une diminution de l'effort d'étirage des tuyaux en acier de 62 à 68 % !

4.5.7. Action pendant les intermittences

Certains systèmes utilisent leurs intermittences pour introduire d'autres actions. Voyons quelques exemples.

Dans de nombreux pays, on transmet à la télévision une sorte de journal écrit (télétexte). Les signaux porteurs du texte sont "dissimulés" dans les cadres d'une émission de télé. A l'aide d'un dispositif supplémentaire, il est possible de "feuilleter" les 999 pages du journal.

Selon le brevet № 343 722, le laminage transversal s'effectue pendant les intermittences du laminage longitudinal.

En 1915, A. Fokker, constructeur renommé d'avions, a résolu le problème du tir à la mitrailleuse à travers l'hélice d'un avion en synchronisant les vitesses de rotation de l'arbre du moteur et du mécanisme de tir de la mitrailleuse (les projectiles passent "dans les intervalles" entre deux pales voisines de l'hélice).

4.5.8. Utilisation des oscillations et de la résonance dans les problèmes de mesurage (de détection)

La fréquence propre des vibrations est une caractéristique universelle. En faisant vibrer un corps quelconque et en modifiant progressivement la fréquence, il est possible de déterminer les caractéristiques du corps (masse, dimensions, élasticité et autres) selon la fréquence au moment d'apparition de la résonance.

Voici quelques brevets qui illustrent cette propriété.

Brevet № 271 051 : procédé permettant de mesurer la masse d'un liquide dans un réservoir en mesurant la fréquence de résonance du réservoir.

Brevet № 244 690 : procédé permettant de mesurer le poids d'un fil en mouvement en mesurant la fréquence de résonance du fil entre deux poulies.

Brevet № 560 563 : procédé permettant de déterminer la quantité de lait restante dans la mamelle d'une vache lors de la traite mécanique en mesurant la fréquence de résonance de la mamelle.

Brevet № 1 008 617 : procédé permettant de mesurer le débit d'une substance qui coule dans des tuyaux en provoquant dans chaque tuyau des vibrations transversales. Afin d'augmenter la précision de la mesure, on fait en sorte que les vibrations forcées des tuyaux pairs aient une fréquence égale à la fréquence de résonance des tuyaux impairs et inversement.

Brevet № 647 597 : procédé de contrôle vibro-acoustique des surfaces porteuses d'appareils volants consistant à générer dans ces surfaces, des vibrations de résonance synchrones, en phase et à mesurer les fréquences de résonance de chaque surface. Afin d'augmenter la sensibilité des mesures et la précision de détection des défauts, plusieurs

couples de capteurs sont installés symétriquement à l'axe longitudinal de l'avion aux points identiques des surfaces porteuses. Une analyse comparative de la phase des signaux de chaque couple permet, en fonction de la différence de phase, de déterminer la taille de l'imperfection, alors que la position des capteurs qui transmettent l'information relative au défaut permet de déterminer son emplacement.

Le système de contrôle de sécurité des parties immergées des plates-formes de forage off-shore (le plus souvent de forme tubulaire) doit être très fiable. Une société française a proposé le procédé suivant : remplir les constructions tubulaires d'air, installer des capteurs de pression, fermer hermétiquement les tuyaux, ainsi, la baisse de pression lors de l'exploitation signalera leur détérioration. Cependant, pour maintenir sa fonctionnalité, ce système se complexifie considérablement, notamment par l'ajout de compresseurs, d'un système de tuyaux, de clapets, de détendeurs de refoulement, etc. Le contrôle par résonance est beaucoup plus simple et fiable. Pour cela, il suffit d'enregistrer préalablement la fréquence des vibrations de chaque tuyau en le frappant (le principe de xylophone). Les fissures modifient la sonorité du tuyau lors de la frappe (tout comme une tasse de faïence fissurée), la fréquence propre change également lors de la pénétration de l'eau à l'intérieur du tuyau (*Science et vie*⁵³, 1983, N° 2, p. 109).

S'il est impossible de faire vibrer l'objet, on évalue son état selon le changement de la fréquence propre des vibrations de l'objet (ou de l'environnement) qui est lié avec lui. Le plus souvent l'objet se trouve en contact avec l'air.

Par exemple, la société "Markoni Avioniks" a conçu un dispositif destiné à déterminer le niveau de charbon dans une soude de 80 m de profondeur. Dans son descriptif, on trouve un radar, un microprocesseur, un écran vidéo, un tableau de commandes, etc. Voilà un système très complexe ! En revanche, le diagnostic en médecine par l'auscultation est connu depuis longtemps. Un principe identique est à la base d'un procédé universel permettant de mesurer le volume de tout matériau pulvérulent ou liquide dans un récipient en fonction du volume d'air au-dessus du matériau (brevets N°N° 321 687, 507 781). Il suffit de sonoriser le récipient, de mesurer la fréquence du son émis par l'air et de définir à l'aide de cette caractéristique le volume d'air et par conséquent le volume du matériau.

La présence ou l'absence de vibrations propres peut servir de signal pour une détection ou une mesure. Si l'intensité de ces vibrations n'est pas assez importante, il est possible de les amplifier en utilisant simplement des résonateurs. Par exemple, dans le brevet N° I 175 778, on propose un dispositif simple et efficace destiné à avertir de l'arrivée d'un train. Il comprend un corps, une tige, une membrane et un résonateur (porte-voix). Le corps se fixe sur un rail et le dispositif amplifie plusieurs fois son bourdonnement.

La résonance n'est pas l'unique moyen de mesure efficace des systèmes. Pratiquement tous les changements de la fréquence propre des vibrations d'un objet peuvent constituer un critère fiable de son état mécanique et de ses propriétés physiques, par exemple :

- *vitesse d'amortissement des oscillations propres,*
Brevet N° 348 945 : procédé permettant de déterminer la contenance dans un œuf de fraction dense et de liquide à l'aide d'un balancier tournant sous la forme d'un disque suspendu par deux fils. On pose l'œuf sur le disque et on actionne le balancier. L'amplitude des oscillations diminue rapidement à cause de la résistance interne (viscosité de la partie dense) du blanc d'œuf. La viscosité de la partie dense de l'œuf est 10 à 12 fois plus importante que celle de la partie liquide. Plus la

⁵³ *Наука и жизнь*, 1983, N° 2, с.109

quantité de la partie dense est importante, plus rapide est l'amortissement des oscillations et inversement. On détermine le rapport entre les parties en fonction du nombre d'oscillations.

- *variation des pertes mécaniques dans l'objet lorsque sa fréquence propre change*, Brevet № 1 004 814 : procédé permettant de déterminer la résistance à chaud de certains matériaux, notamment des thermodurcissables. Ce procédé consiste à augmenter progressivement la température de l'échantillon en agissant sur lui par l'intermédiaire de vibrations et à déterminer le moment de son ramollissement grâce à un brusque changement dans les pertes mécaniques entre la source de vibrations et le capteur.
- *variation de l'amplitude des oscillations propres*, Brevet № 1 024 227 : procédé permettant de déterminer la limite admissible d'usure d'un foret en mesurant l'amplitude des vibrations générées par le système instrument – machine-outil (que l'on compare avec les paramètres d'usure admissible définis préalablement).
- *spectre des vibrations sonores utilisé pour déterminer l'état d'une multitude d'objets en mouvement*. Brevet № 190 603 (République Tchèque) : procédé permettant de déterminer le changement d'état d'une couche de particules lorsqu'elle est traversée par un gaz ou un liquide. L'enregistrement permanent des variations d'un spectre de vibrations sonores générées par le passage d'un flux à travers la couche de particules indique ce changement d'état. Par exemple, on peut assister à une agglomération partielle de particules à la suite de leur fusion ou de la destruction de particules fragiles de la couche.
Un autre projet fut de vérifier l'authenticité de billets de banque au moyen du spectre acoustique du bruit émis par le papier spécial utilisé dans la fabrication des billets (*Chimie et vie*⁵⁴, 1982, № 8, p. 95).
Le produit de l'année 1988 aux Etats-Unis est un analyseur miniature du spectre acoustique d'une automobile en marche destiné à évaluer son état technique ; on touche la carrosserie avec un indicateur de la taille d'un stylo puis on détecte les défauts cachés (corrosion, etc.) (*Industrie socialiste*⁵⁵, 21.01.89, p. 3).

S'il est impossible de déterminer les variations de la fréquence propre du système, alors on utilise des objets attachés, on analyse les variations de fréquence des vibrations propres d'un tel objet et en fonction de cette analyse on interprète les changements dans le système.

Brevet № 616 536 : ce procédé permettant de déterminer l'effort dans un élément torche préalablement tendu consiste à disposer sur cet élément, dans une section donnée, une masse associée, puis à agir dans cette section par le biais d'une force génératrice, à mesurer la fréquence des vibrations propres du système et à calculer l'effort nécessaire. Afin d'augmenter la précision des calculs, on modifie la masse associée, on génère des vibrations dans le système obtenu, on mesure la fréquence des vibrations propres et on calcule l'effort selon les résultats des deux mesures.

Brevet № 900 178 : ce procédé permettant de contrôler des éléments d'une construction sans les détériorer consiste à générer dans l'élément à contrôler des vibrations en

⁵⁴ *Химия и жизнь*, 1982, № 8, с.95

⁵⁵ *Социалистическая индустрия*, 21.01.89, с.3

flexion, à mesurer sa fréquence propre et à calculer selon elle, les paramètres d'autres éléments de la construction. Pour accroître la précision du mesurage, on fixe sur l'élément à contrôler et sur un élément adjacent des masses concentrées supplémentaires et on mesure la fréquence propre de l'élément contrôlé, puis on modifie les valeurs des masses concentrées en faisant en sorte que les fréquences propres des vibrations de l'élément contrôlé coïncident avec différentes valeurs de la masse concentrée supplémentaire de l'élément adjacent.

Brevet № 628 237 : procédé permettant de déterminer l'altération d'un pieu qu'on enfonce dans la terre selon le changement de vibrations du sol.

Le procédé permettant de contrôler la pression des pneus d'une automobile (*Inventeur et innovateur*⁵⁶, 1989, № 11, MI 0128) consiste à appuyer un "pistolet" contre un pneu, à presser la détente et à déterminer la pression d'air selon le caractère des vibrations provoquées dans le pneu.

Brevet № 630 577 : procédé permettant de détecter des défauts dans des objets. Ce procédé consiste à générer dans l'objet des vibrations à l'aide d'un capteur muni d'un percuteur, puis à mesurer les paramètres des vibrations du percuteur et à évaluer ainsi la présence de défauts dans l'objet. Pour augmenter la précision du contrôle, on utilise, en tant que paramètres liés aux vibrations du percuteur, l'amplitude et la largeur du spectre de ses vibrations propres.

Même un volume éloigné et non attaché à l'objet, mais résonant, est capable d'aider à la résolution des problèmes de mesurage et de détection de vibrations.

Durant l'été 1932 à bord du brise-glace "Taïmyr", on procédait au lancement de sondes météorologiques en forme de ballon. Pendant les préparatifs, le visage d'un scientifique a effleuré par hasard le ballon ; il a reculé brusquement à cause d'une douleur aiguë ressentie dans les oreilles. Cherchant à expliquer ce phénomène, le futur académicien V.V. Chouleïkin a conclu que l'enveloppe du ballon rempli d'hydrogène jouait le rôle d'un résonateur qui amplifiait les vibrations sonores d'une fréquence de 6 à 12 Hz. Ce sont ces dernières qui ont provoqué cette douleur dans les oreilles. Qu'est-ce qui a généré ces vibrations ? Il s'est avéré que la source du son d'une fréquence aussi basse provenait de la tempête qui se déchaînait à des centaines de milles de "Taïmyr". Plus tard cette découverte a permis de concevoir un dispositif destiné à prédire les tempêtes (*Jeune technicien*⁵⁷, 1988, № 7).

4.6. DYNAMISATION DES SYSTEMES TECHNIQUES

4.6.1. Formulation de la loi et principales règles de sa mise en application

Quatrième loi : *Pour augmenter leur efficacité, les systèmes rigides doivent devenir dynamiques, autrement dit ils doivent évoluer vers une structure plus souple, rapidement modifiable et vers un régime de fonctionnement qui s'adapte aux changements de leur environnement.*

⁵⁶ *Изобретатель и рационализатор*, 1989, № 11, МИ 0128

⁵⁷ *Юный техник*, 1988, №7

A partir de la synthèse du système et aux premières étapes de son évolution, le ST possède généralement des liens intérieurs rigides et ne contient pas de sous-systèmes destinés à modifier son régime de fonctionnement par rapport aux variations des conditions extérieures. Par conséquent, les ST sont très vulnérables, tombent souvent en panne et ne durent pas. C'est pourquoi l'étape de la dynamisation est incontournable.

Dans les systèmes mécaniques, la dynamisation commence en règle générale par une transition des parties immobiles vers des parties mobiles. Le lien (ou la construction) rigide "se rompt" et à cet endroit précis, on introduit une charnière, on remplace des éléments rigides par des éléments flexibles puis par des constructions hydrauliques et pneumatiques, on utilise la vibration, le changement périodique de la forme, etc.

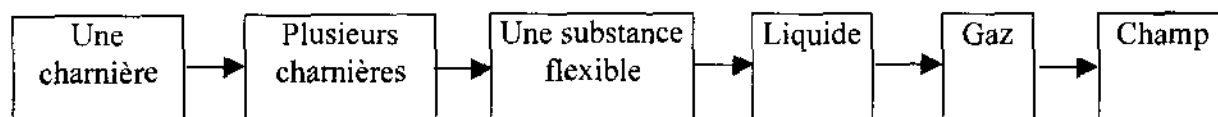
Les étapes ultérieures de la dynamisation se caractérisent par l'utilisation d'effets et de phénomènes physiques et chimiques, l'introduction d'un asservissement, la substitution des systèmes et des sous-systèmes par des substances idéales, l'apparition des premières étapes d'auto-organisation, l'"intellectualisation" de la technique.

La dynamisation repose sur les principes fondamentaux de l'organisation des processus naturels. Rappelons par exemple le principe de Le Chatelier : si l'on agit de l'extérieur sur un système en état d'équilibre en modifiant un de ses paramètres (température, pression, concentration), alors l'équilibre se déplace dans le sens d'une réduction du changement. Le système se réorganise, "évite" l'influence nuisible du facteur extérieur, accroît sa viabilité (bien évidemment à l'aide de l'homme), s'adapte aux conditions données et aux besoins constamment croissants de l'homme et de la société. Voilà en quoi consiste l'essentiel de la dynamisation.

Deux voies types de résolution de problèmes d'innovation sont basées sur cette loi :

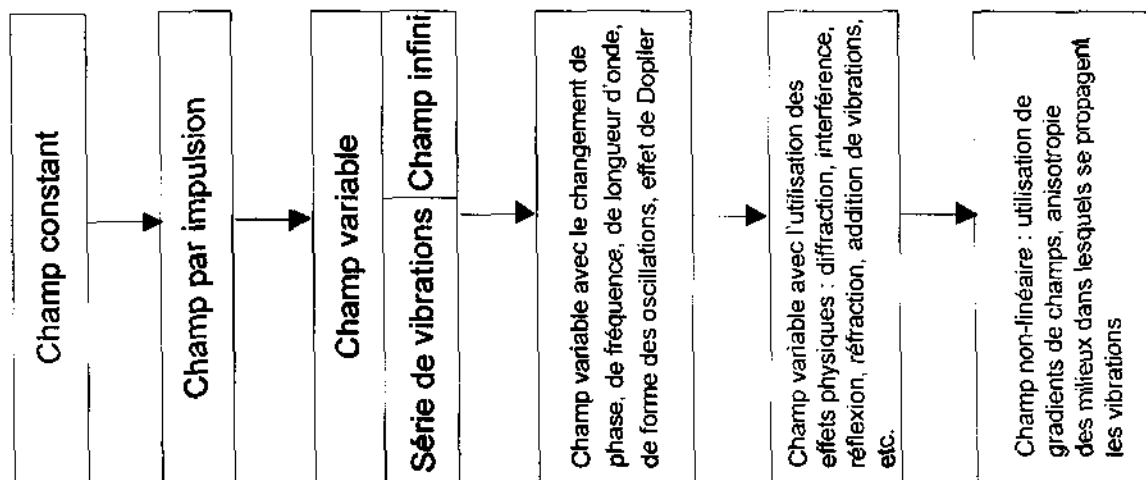
1) *Dynamisation de la substance du système.*

La dynamisation commence généralement par une division de la substance en deux parties liées au moyen d'une charnière, puis elle suit cet enchaînement : **une charnière – plusieurs charnières – une substance flexible – un liquide – un gaz ; parfois la dynamisation se termine par la substitution d'un lien matériel par un champ :**



2) *Dynamisation du champ.*

La dynamisation du champ s'effectue dans le cas le plus simple par **la transition d'une action continue vers une action par impulsion, puis vers des champs variables et non linéaires.**



Les deux voies de la dynamisation illustrent uniquement les étapes caractéristiques des changements dans les systèmes. Les systèmes ne passent pas forcément par toutes les étapes et sont loin d'atteindre tous la fin de ces enchaînements au cours de leur évolution.

4.6.2. Application de la loi dans la pratique de l'innovation

L'utilisation de la loi de dynamisation (comme de toutes les autres lois) dans la pratique innovante simplifie considérablement, non seulement le processus de résolution, mais aussi la recherche de problèmes. La connaissance des lois d'évolution des ST permet de déceler et de formuler avec précision des problèmes d'innovation. Sachant que tout ST passe par les étapes de dynamisation, il faut juste déterminer l'étape à laquelle il se trouve actuellement et évoluer à l'étape suivante. La seule difficulté consiste à déterminer l'endroit "malade" dans un ST. Pour cela, il suffit d'appliquer une règle très simple : la partie du système qui subit le plus de contraintes de la part de l'environnement doit être dynamisée en premier lieu. Il est à noter que des actions nuisibles à l'encontre des ST peuvent être naturelles, sociales ou provenant d'autres ST.

Exemples d'introduction d'une charnière :

- ❑ en France, on fabrique des grues munies d'une cabine qui se déplace de haut en bas afin de faciliter le travail du grutier (pendant le chargement et le déchargement, son champ de vision s'élargit) ;
- ❑ brevet N° 742 639 : un écrou dont le filetage peut être dissocié du corps ; si l'on sépare cet écrou du corps, la partie fileté (constituée de deux segments) s'enlève aisément du boulon sans être dévissée ;
- ❑ brevet N° 645 661 : le jouet "poussah" est constitué d'un corps dont les surfaces, inférieure et supérieure, sont sphériques et d'un poids placé dans sa partie inférieure. Pour étendre les possibilités de jeu, une tige verticale se situe à l'intérieur du corps et le poids est fixé librement sur la tige de manière à ce qu'il puisse se déplacer tout du long.

Un ingénieur qui a participé à la construction de l'avion de Iakovlev (le Iak-50) relate qu'une solution singulière au problème de fixation au fuselage d'une aile de faible épaisseur en forme de flèche aiguë a été apportée : "Il faut dire qu'à l'époque nous nous sommes beaucoup attardés sur cette partie cherchant à assurer la solidité requise. Nous avons renforcé plusieurs fois la construction mais à chaque fois, lors des essais statiques, elle se détruisait

avant d'atteindre les charges requises. C'est à ce moment que Guéorgui Vladimirovitch a proposé une solution originale à ce problème malencontreux. Un élément articulé fut introduit. La modification de la partie en question selon la proposition de G.V. Smirnov s'est avérée efficace car l'avion a dès lors montré de bons résultats pendant les essais en vol" (P.Y. Kozlov, *Constructeur*⁵⁸. M. : Machinostroénié, 1989, p. 45).

Exemples d'introduction de plusieurs charnières :

- ❑ brevet № 3 561 679 (Etats-Unis) : une tuyère d'un moteur à réaction sous forme d'un tuyau télescopique ; lors de la mise en marche, la tuyère s'allonge ; lors du transport, ses parties s'emboîtent ;
- ❑ brevet № 497 381 : un bâtiment résistant aux séismes placé sur des charnières coniques situées entre la carcasse du bâtiment et les pieux de fondation ;
- ❑ en Finlande, une machine à débarrasser les chemins forestiers, les trouées et les pentes des taillis et des arbustes a été conçue. Les couteaux souvent cassés par des pierres lors de cette opération ont été remplacés par des chaînes. Ces chaînes tournent avec une vitesse de plusieurs centaines de tours par minute et coupent les taillis comme un rasoir en contournant les pierres ;
- ❑ chez Fiat, en concevant l'automobile de l'an 2000, les constructeurs sont arrivés à l'idée que l'automobile doit être constituée de deux composants : un châssis d'une part et d'autre part, une carrosserie démontable qui peut changer d'aspect comme un mannequin changerait de robe. Ainsi, l'automobiliste pourra varier les ailes avant de la voiture, les portes, le capot, les vitres, le tableau de bord car toutes ces parties seront vendues séparément.

Qu'est-ce qu'une grue de nos jours ? En réalité, c'est un ancien treuil avec une flèche fixée dessus. On a beau tourner ou baisser la flèche, la grue ne peut prendre que la charge se trouvant juste sous les poulies où passe le câble avec un crochet. Même une grue des plus sophistiquée avec une flèche télescopique et une commande hydraulique ne peut pénétrer dans la fenêtre ou l'orifice d'un bâtiment en construction et prendre une charge située dans un recoin du chantier. Les grues conserveront cette limite de leurs performances jusqu'à ce que leur flèche devienne souple (à la manière du cou d'un cygne).

Une telle flèche existe : elle est constituée d'éléments articulés au moyen de charnières, notamment de disques d'acier avec un diamètre progressivement décroissant. La flèche ressemble au tuyau d'un masque à gaz et les disques qui se trouvent à l'intérieur constituent une carcasse flexible assurant à la flèche la stabilité nécessaire. Chaque disque est fixé sur tout son périmètre aux parois élastiques de la flèche. Les côtés opposés des disques sont traversés par des câbles en acier. Si l'on tire un câble ou un autre (pour cela la plateforme tournante comporte des cylindres hydrauliques et les mécanismes correspondants), la flèche se déformera d'une manière surprenante. L'organe préhenseur de cette flèche peut pénétrer, non seulement dans une fenêtre, mais aussi dans la cave d'un bâtiment en construction (*Nouveautés dans la vie, la science et la technique*⁵⁹. Série "Technique", 1988, № 6, p. 28).

⁵⁸ Козлов П.Я. *Конструктор*. М.: Машиностроение, 1989, с.45

⁵⁹ *Новое в жизни, науке, технике*. Серия "Техника", 1988, № 6, с.28

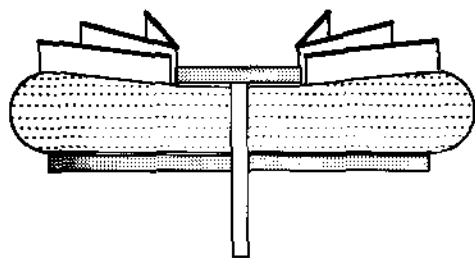
Exemples d'introduction d'éléments flexibles :

- brevet № 965 789 : un outil destiné à usiner des trous borgnes de grande profondeur est réalisé en forme de ressort dont les extrémités sont recouvertes de grains de diamant ;
- brevet № 994 153 : un foret sous forme d'un ruban multicouches enroulé en spirale ;
- brevet № 889 113 : un élément filtrant destiné à purifier des gaz et des fluides sous forme d'une spirale dotée de spires serrées qui laissent passer le flux mais pas les impuretés ; dès que la quantité d'impuretés retenues atteint une valeur critique, la pression à l'intérieur de la spirale augmente, étire la spirale et cette dernière se libère du dépôt d'impuretés ;
- aux Etats-Unis, le problème de protection des berges contre l'érosion due aux vagues est résolu ; au lieu d'énormes constructions en béton censées renforcer les berges (avec le temps les vagues détruisent également ces "murs de forteresse"), on utilise des algues artificielles fabriquées en polypropylène, inoffensives pour l'environnement ; les algues se fixent sur un tuyau ancré à proximité de la berge et retiennent les grains de sable, ces dépôts de sable augmentent de 5 à 7 cm par jour et amortissent ainsi l'énergie des vagues ;
- les miroirs à géométrie variable (derrière leur surface rendue flexible, se trouve un compartiment pneumatique rempli à pression variable) ont trouvé une large utilisation, notamment dans les rétroviseurs d'automobile, les centrales solaires, les télescopes, etc. ;
- brevet № 1 072 089 : un globe terrestre réalisé en un matériau élastique qui permet d'étudier la structure interne de la Terre et les mouvements verticaux de la lithosphère sous l'action des forces de gravitation du Soleil et de la Lune (aimants) ;
- en ex-RFA, on fabrique des crayons en plastique souple et longs de 500 mètres, ils sont livrés en rouleaux au magasin où l'on coupe à l'acheteur un morceau de la taille voulue (*Science et vie*⁶⁰, 1983, № 3, p. 85) ;
- brevet № 1 130 237 : un ruban fin et léger en acier a remplacé, dans l'organe de coupe d'une faucheuse, les "ciseaux" lourds et imprécis. De plus, le ruban peut être réglé en fonction du relief du sol au moyen de tringles.

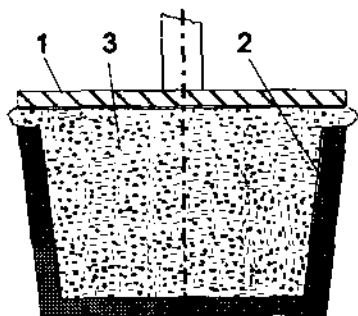
Exemple d'introduction d'un liquide :

- brevet № 1 069 662 : l'organe de travail d'un épandeur centrifuge dans lequel, pour améliorer l'uniformité d'épandage d'engrais par la modification de la valeur de l'angle de positionnement des ailettes, ces dernières sont fixées sur un réservoir souple rempli d'un liquide ; l'angle d'inclinaison des ailettes varie alors selon le changement de quantité de liquide du réservoir.

⁶⁰ *Наука и жизнь*, 1983, № 3, с.85



- Il existe des blocs d'assise en béton armé qui possèdent la même forme conique et le même rapport entre l'épaisseur des parois, la hauteur et le diamètre que des verres polyédriques. Qu'arrive-t-il si l'on pose un verre par terre, si l'on couvre ce verre d'une plaque métallique et si l'on tape dessus avec une masse en essayant de l'enfoncer dans la terre ? A peu près la même chose arrive au bloc d'assise de béton quand la masse d'un marteau-pilon frappe sur ses parois. Très peu de ces blocs survivent à de telles sollicitations. Les parois, qui doivent être ré-assemblées sur place dès l'enfoncement subissent des efforts maximums. Pour limiter les dégâts, on s'efforce d'agir plus délicatement, en frappant moins violemment. Dans ce cas, la pose de fondations prend plus de temps. Une des propositions consiste à insérer dans le massif un bloc en métal et à frapper dessus. Cependant, l'insert rigide a beau reproduire précisément la forme du bloc, la répartition irrégulière des charges et sa détérioration ne sont pas exclues. Les auteurs d'un nouveau procédé ont proposé d'utiliser un sac de sable, en d'autres termes, un insert souple au lieu d'un insert rigide.



Brevet N° 675 134 : la masse (1) frappe, non pas le bloc fragile (2), mais un sac de sable (3) qui répartit uniformément la pression et protège les parois du bloc.

Enfoncement par un sac de sable

Il ne faut pas oublier qu'il n'existe pas de constructions absolument rigides. Toute construction peut subir une flexion dans une certaine limite angulaire. Une bonne astuce consiste, *pour rendre plus souple un élément rigide, à augmenter sa longueur*. Par exemple, lors de la construction de canalisations, il est souvent nécessaire de raccorder des tuyaux longs de plusieurs centaines de mètres. Cependant, les têtes de chalumeau ne fonctionnent que sur $\frac{1}{4}$ de leur circonférence et il est impossible de tourner tout l'ensemble des tuyaux. De ce fait, le bas du raccord est inaccessible pour la soudure et une soudure manuelle devient inévitable. Dans le brevet N° 340 495, on propose de tordre les tuyaux à 180 degrés, ce qui est sans incidences dans le cas de canalisations de longueur importante.

Un procédé identique est employé dans le brevet N° 901 377 : on a conçu une machine à poser des longueurs de voies montées à l'avance (fig. 17-1) qui enlève les anciens rails avec leurs traverses et pose simultanément les nouveaux ; la longueur des rails à remplacer est de 800 mètres. De ce fait, on les tord librement en spirale en les disposant sur les mêmes plates-formes.

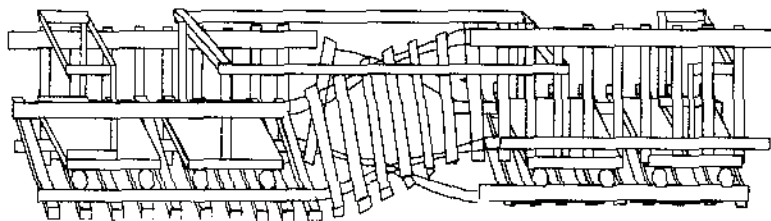
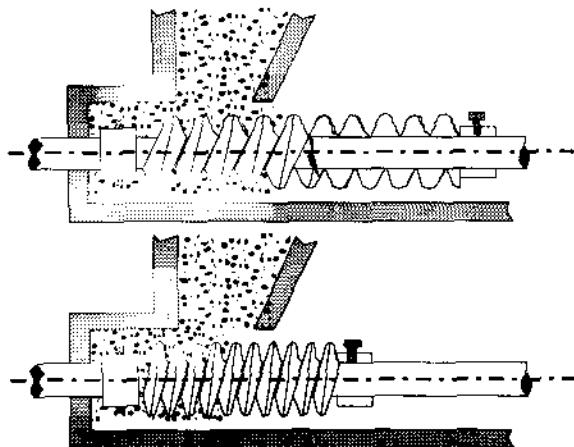


Fig. 17-1. Procédé 901 377

Dans un doseur de matières pulvérulentes, un convoyeur est réalisé en matériau élastique. Cela permet de contrôler le pas du convoyeur (brevet № 222 781).



La dynamisation d'un télescope et autres instruments d'optique s'est avérée tellement efficace qu'on a vu naître une nouvelle science : l'optique adaptative (c'est-à-dire une optique qui s'adapte aux effets néfastes de l'environnement, notamment à la pollution, aux changements de position du Soleil, etc.). Cette nouvelle science a donné lieu à diverses innovations : des miroirs à membranes autonomes qui prennent une forme parabolique, des lentilles liquides dont la distance focale est variable et même un télescope liquide où un liquide en rotation (par exemple du mercure) prend la place du miroir (*Revue astronomique*⁶¹, 1985, Vol 62, № 3, p. 598).

Voilà une innovation datant de 1949 (brevet № 76 409) : procédé de fabrication de miroirs concaves pour des télescopes à réflexion. On place de l'argent dans un réservoir, on soude le couvercle et on évacue l'air, puis des brûleurs oxyhydrogéniques chauffent le réservoir jusqu'à fusion de l'argent, un moteur électrique tourne le réservoir et la surface de l'argent devient idéalement parabolique. L'évacuation de l'air est indispensable pour que ce dernier ne soit pas absorbé par le métal en fusion car le gaz absorbé, lorsqu'il s'échappe, provoque la formation de pores sur sa surface.

Il est possible de créer des lentilles d'air chaud directement dans le tube d'un télescope. Les lentilles traditionnelles de télescopes, particulièrement des télescopes de taille importante, sont extrêmement sensibles aux changements de température et de ce fait, nécessitent un système de thermorégulation complexe. Pour éviter cette complication, on a conçu des objectifs de télescope dans lesquels au lieu de lentilles ordinaires de verre ou de miroirs, on utilise des lentilles gazeuses. Une lentille gazeuse est formée par un tube métallique en rotation. Les parois chaudes du tube chauffent l'air contenu dans le cylindre.

⁶¹ *Астрономический журнал*, 1985, т. 62, вып. 3, с.598

Plus l'air est proche des parois, plus il est chaud. Grâce à l'échauffement, la déflexion de l'air change et crée l'effet de lentille (*Inventeur et innovateur*⁶², 1989, № 11, p. 37).

Plus les exigences vis à vis d'un système sont inexorables, plus rapide est sa dynamisation. Par exemple, les exigences liées à la précision des machines n'ont pas évolué durant des décennies (jusqu'au XX^e siècle). Les solutions techniques, une fois trouvées, restaient immuables et satisfaisaient les besoins. Néanmoins, dès qu'il a fallu accroître la FUP, les composants des machines-outils ont commencé à se perfectionner de façon intensive.

Les couples de friction (par exemple, l'arbre et son support), qui sont à la base de toutes les machines-outils modernes, ont brusquement changé durant ces dernières décennies.

Autrefois (de la machine-outil de Nartov jusqu'au XX^e siècle), les exigences envers la précision de l'usinage se limitaient au millimètre et pour cela, le contact direct des pièces, en l'occurrence de l'arbre et de son support, suffisait. C'était l'époque technologique du contact sec entre les surfaces. Lorsque la précision de l'usinage s'est affinée jusqu'au dixième de millimètre (voire jusqu'au micron), on s'est mis à utiliser des lubrifiants. Dans les années 80, l'ingénieur T. Orlovski a breveté l'idée suivante : un palier dans lequel l'arbre n'est pas en contact avec le palier lors de la rotation et semble être en lévitation dans un bain d'huile remplissant l'espace entre l'arbre et le palier. Ce fut l'idée du palier à fluide hydrostatique. L'accroissement ultérieur de la précision a nécessité des supports encore plus idéaux. Ainsi, on a vu apparaître des supports gazostatiques (on fait passer le gaz sous pression par des coussinets poreux formant les supports des arbres). La dynamisation des supports a même atteint le stade de l'utilisation d'un champ : des supports magnétiques sont utilisés avec succès dans des machines-outils ultra précises.

En électrotechnique, depuis le début de ses développements, un des objectifs les plus importants a été *d'augmenter la durée de vie et la fiabilité des contacts*. Comme le disent certains ingénieurs, l'électrotechnique est la science des contacts, l'essentiel de cette science est d'assurer la présence d'un contact là où il doit être et son absence là où il ne doit pas être. Ce problème est toujours d'actualité pour les constructeurs de moteurs et de générateurs électriques, car les collecteurs forment la partie la plus instable de ces appareils. L'analyse de la base de brevet de Russie des 50 dernières années a démontré une tendance nette de développement des balais de collecteur :

1. balais en charbon,
2. particules ferromagnétiques + champ magnétique (un aimant permanent),
3. liquide magnétique,
4. filets d'un gaz ionisé,
5. décharge électrique sous vide d'air.

Il est à noter que plus de 20 années ont été consacrées au perfectionnement des balais en charbon. Quelques dizaines d'innovations ont été réalisées pour mettre en contact un balai en charbon et un fil de cuivre. On cherchait à résoudre la contradiction technique suivante : l'agglomération par frittage du charbon et de la suie nécessite une température de 500 à 600 degrés, cependant à cette température, une couche d'oxyde (diélectrique) se forme sur le cuivre. Grâce au brevet français № 1 557 274, on a réussi à résoudre cette contradiction : on a

⁶² *Изобретатель и рационализатор*, 1989, № 11, с.37

proposé de réaliser un conducteur en fibres de carbone et de fritter l'extrémité du conducteur afin d'obtenir un balai en charbon.

4.7. AUGMENTATION DU DEGRE DE VEPOLISATION DES SYSTEMES⁶³

4.7.1. Formulation de la loi et les principales voies de complexification des systèmes

Cinquième loi : Le développement des systèmes techniques tend vers un niveau plus élevé de vépolisation : les systèmes non-vépolisés, c'est-à-dire constitués de vépoles qui ont des défauts, cherchent à devenir vépolisés, alors qu'à l'intérieur des systèmes vépolisés, le développement s'effectue au moyen de la multiplication des liens entre les éléments, ainsi que de l'augmentation de la sensibilité et du nombre d'éléments.

La loi est valable pour la période de croissance des systèmes techniques. Au fond, c'est une loi de complexification des vépoles – car tout ST peut être présenté comme un ensemble de vépoles simples. Comment naissent les ST ? Le besoin qui apparaît est d'abord assuré par un vépole simple : l'objet est traité à l'aide d'un outil de travail, c'est-à-dire d'un instrument et de la force humaine. Cependant, les défauts de ce premier vépole se manifestent progressivement lors du fonctionnement du système, de même qu'apparaissent de nouveaux besoins : il faut donc augmenter la fonction utile du système, éliminer la participation de l'homme, associer au ST de nouvelles fonctions utiles, éliminer les fonctions néfastes, etc. Tous ces besoins se transforment l'un après l'autre en sous-systèmes complémentaires, qui manifestent à leur tour leurs défauts et ainsi de suite.

C'est ainsi que sont apparus tous les ST modernes complexes qui descendent de la pierre, du bâton et de la roue. Evidemment, la complexité ne peut pas croître indéfiniment. À une étape donnée de son évolution, un ST se heurte à des contraintes (physiques, économiques, écologiques) et la phase de la transformation du ST en une substance idéale commence.

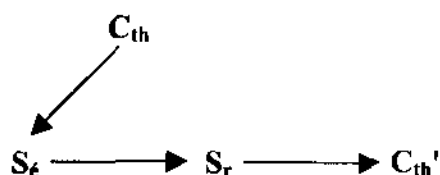
La loi de complexification des vépoles est basé pour l'essentiel sur une dimension importante : dans un ST, c'est la partie du vépole qui éprouve le plus de difficultés lors de la réalisation de la FUP qui va se complexifier. En outre, n'importe quel élément ou lien dans un vépole peut constituer le point "sensible", c'est-à-dire la partie où l'on va rencontrer des difficultés.

Exemple : La transmission de la chaleur sur une distance : le caloduc simple

Le besoin de transmettre la chaleur à distance a déterminé la FUP du futur système : le transfert de chaleur d'un point à un autre.

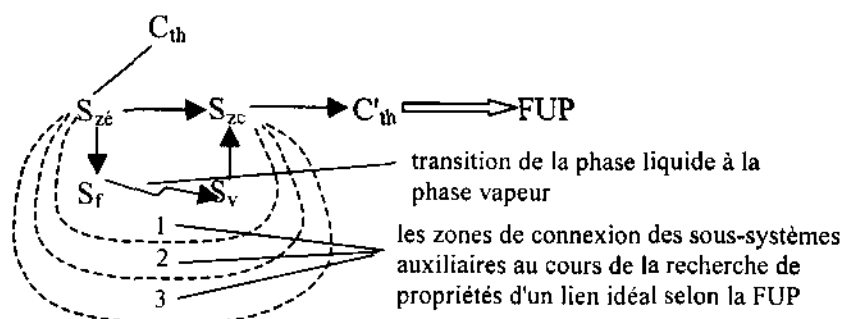
Le moyen de transmission de chaleur le plus simple est un lien métallique entre les points. On peut considérer ce système comme le système ayant précédé les caloducs. La figure ci-dessous donne une représentation sous forme vépole de ce système.

⁶³ Revue par Philippe Lutz et par Nathalie Gartsier, 2001-2002

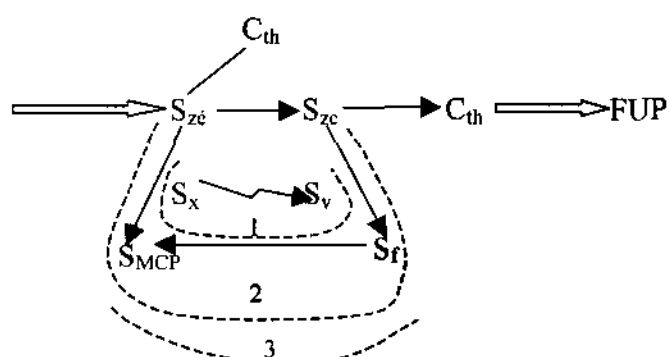


Dans ce cas, une extrémité de la tige (S_e) constitue la zone d'échauffement et l'autre extrémité (S_r), la zone de refroidissement (la zone C_{th} restitue la chaleur à l'objet qui doit être chauffé). La différence entre C_{th} et C_{th}' se dissipe au cours de la transmission par la tige. De ce fait, la tige métallique assurant la FUP, il est nécessaire d'augmenter son efficacité ; par conséquent, c'est elle que l'on va développer.

L'étape suivante de l'évolution se concrétise par le thermosiphon (un tuyau avec un fluide de travail l'eau). S_{ze} est la zone d'évaporation dans le thermosiphon, c'est-à-dire le récepteur de chaleur, S_{zc} est la zone de condensation de vapeur en liquide, c'est-à-dire la zone de restitution de chaleur, S_f est le fluide de travail, S_v est la vapeur.



L'étape suivante est le caloduc de Gogler. On a ajouté un nouveau sous-système au thermosiphon, notamment le retour d'un fluide condensé vers la zone de vaporisation à l'aide d'une mèche en matériau capillairo-poreux :



Ainsi, la complexification des vépoles est une étape obligatoire dans l'évolution de tout système technique. Elle se déroule comme suit :

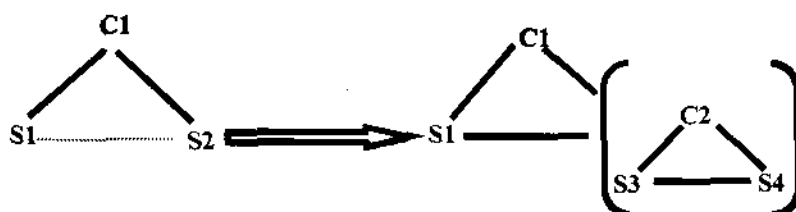
- on mobilise les ressources de substance et de champ (RSC). Pour cela, on utilise de manière plus complète les ressources existantes ou celles qui sont "gratuites" ;
- on introduit dans les vépoles des substances et des champs qui permettent, sans complexification considérable du système, de réaliser de nouveaux effets physiques (EP), d'élargir les capacités fonctionnelles d'un système et d'augmenter ainsi son degré d'idéalité ;

- s'il est impossible d'utiliser les RSC et les nouveaux EP, on "complète" le système en ajoutant de nouveaux sous-systèmes qui ont des fonctions utiles qui non seulement augmentent la FUP du système, mais l'améliorent (ce sont des "brouillons" de futures substances idéales).

4.7.2 Formation d'un vépole en chaîne

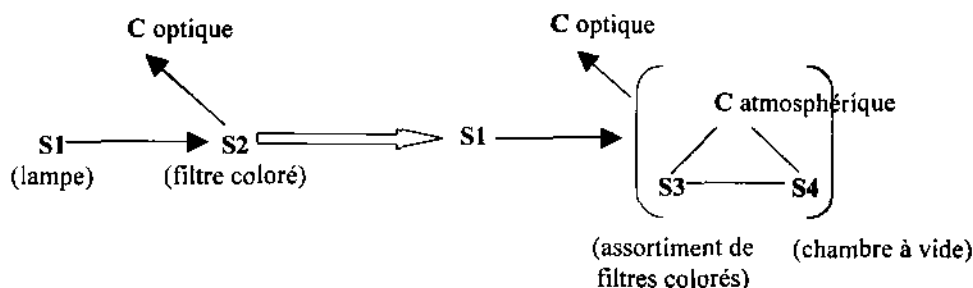
S'il est nécessaire d'augmenter l'efficacité d'un vépole, on résout le problème en transformant une des parties du vépole en un vépole contrôlé indépendamment, ce qui entraîne la formation d'un vépole en chaîne.

a) le développement d'une substance en un vépole :

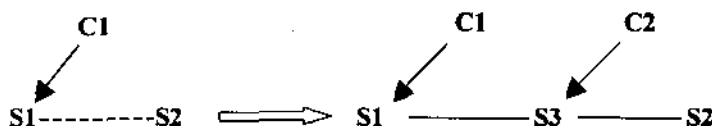


La substance S_2 est transformée en vépole composé du champ C_2 et des substances S_3 et S_4 . S_3 ou S_4 peuvent à leur tour être développées en un vépole.

Par exemple, il a été inventé un luminaire décoratif qui change de couleur en fonction de la pression atmosphérique. Un luminaire ordinaire dispose d'un seul filtre coloré immobile, alors que dans le nouveau luminaire, les filtres colorés sont fixés sur une chambre à vide en accordéon qui change de volume en fonction de la pression atmosphérique et déplace les filtres colorés polychromes (brevet N° 669 726).



b) le développement de liens dans un vépole :



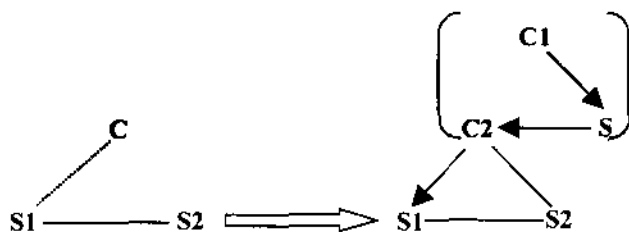
Dans ce cas, le chaînon C_2 - S_3 va s'intégrer dans le lien S_1 - S_2 .

Par exemple, dans le brevet de Grande Bretagne N° 824 047, on propose un dispositif qui permet de transmettre la rotation d'un arbre à un autre : les arbres sont insérés des deux côtés dans un manchon cylindrique. L'espace libre entre eux contient un fluide magnétique qui durcit dans un champ magnétique, le manchon étant un électro-aimant. Si l'électro-aimant n'est pas actionné, les arbres (S_1 , S_2) tournent librement l'un par rapport à l'autre (grâce à C_1).

Lorsque l'électro-aimant (C_2) est actionné, le fluide (S_3) durcit et relie rigidement les arbres : ce qui permet de transmettre le couple d'entraînement.

c) le développement d'un champ dans un vépole :

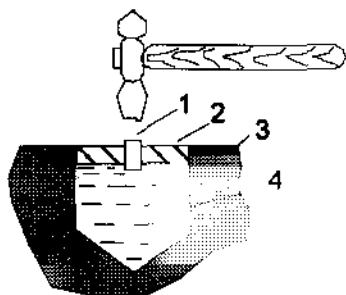
On remplace, dans ce cas, le champ agissant par un autre champ que l'on peut contrôler.



Nous pouvons illustrer ceci par le problème de l'extraction d'une douille d'emmanchement montée à force d'un trou borgne.

Pour saisir l'extrémité de la douille, il a fallu réaliser une cannelure à l'intérieur de la douille et arracher la douille du corps de la pièce par un extracteur spécial. Ce procédé est long, peu fiable et inadmissible lors d'un démontage en série.

Il existe une solution beaucoup plus efficace (fig. 18) : on verse de l'huile dans l'orifice, on y insère un cylindre en acier sur lequel on donne un coup de marteau. Dans l'huile, on crée un choc hydraulique générant une onde qui amplifie maintes fois de suite l'action externe et la douille se retire (*Technique et science*⁶⁴, 1984, № 3, p. 39).

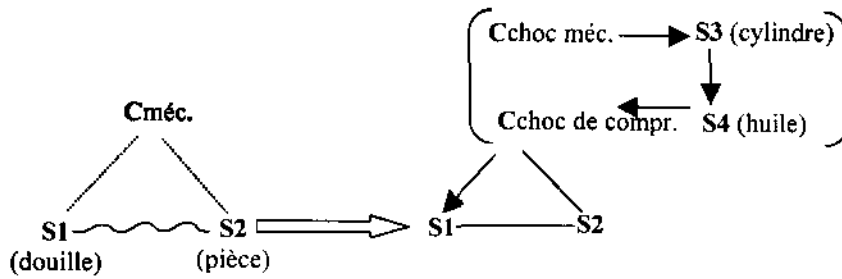


1 – cylindre-piston, 2 – douille, 3 – corps, 4 – huile

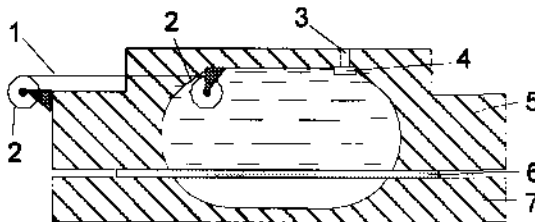
Fig. 18. Procédé d'extraction d'une douille d'emmanchement montée à force.

On peut représenter l'évolution de ce système par la transformation du modèle vépole initial comme donné sur la figure suivante.

⁶⁴ *Техника и наука*, 1984, № 3, с.39



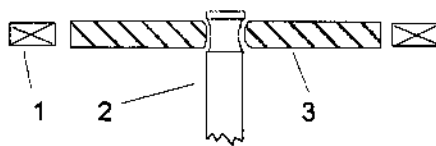
Le brevet N° 566 656 propose un autre moyen d'augmenter la pression dans l'huile. On remplit le réservoir d'huile, la soupape se ferme, on rembobine l'élément souple (la bande) de l'enrouleur externe sur l'enrouleur interne, le volume de l'élément souple à l'intérieur du réservoir s'accroît, la pression monte brusquement et le matriçage de la pièce s'effectue (fig. 19). Selon le brevet N° 118 162 (prototype du brevet N° 566 656), on injectait dans la chambre de matriçage de l'azote liquide. Lors de l'échauffement la pression montait, mais ne dépassait pas 600 à 700 atmosphères ce qui rendait impossible le matriçage des tôles épaisses.



1 – élément souple (bande), 2 – enrouleurs, 3 – orifice, 4 – soupape, 5 – réservoir, 6 – pièce, 7 – matrice

Fig. 19. Procédé d'obtention de haute pression selon brevet N° 566 656.

Le brevet N° 1 298 439 décrivant un procédé d'accouplement démontable d'une pièce mâle et d'une pièce femelle, nous montre une autre façon de développer un champ. Selon ce procédé, pour diminuer la dépense de travail et accroître la productivité du montage et du démontage de l'accouplement, la pièce mâle est fabriquée en matériau magnétostrictif avec un coefficient positif de magnétostriction et sa déformation élastique est effectuée par un champ magnétique (fig. 20).

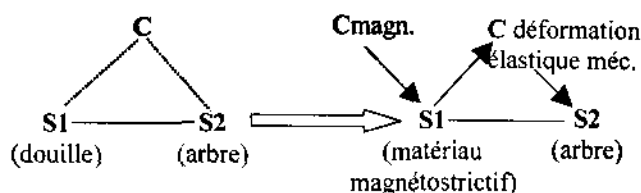


1 – électro-aimant, 2 – arbre, 3 – douille.

Fig. 20. L'accouplement démontable selon le brevet N° 1 298 439.

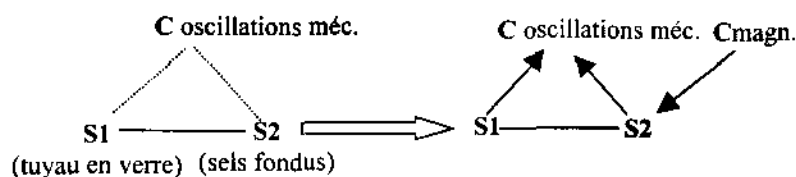
En d'autres termes, les champs difficilement contrôlables tels que les champs mécaniques (emmanchements, évasement) et thermiques (serrage à chaud) sont remplacés par un champ magnétique facilement contrôlable auquel s'ajoute le changement de substance de la douille.

La figure ci-dessous donne l'image de la transformation du vèpole associé.



Le brevet № 994 447 nous donne un nouvel exemple. Le renforcement de tuyaux en verre se fait par un procédé basé sur l'échange d'ions dans les sels fondus accompagné d'une application d'oscillations élastiques. Pour améliorer la qualité des tubes de longueur illimitée, on les déplace dans des sels fondus, on génère des oscillations élastiques en appliquant un champ magnétique alternatif et on dirige les oscillations perpendiculairement à l'axe du tuyau.

La figure ci-dessous montre le système vépole correspondant à la génération mécanique d'oscillations élastiques remplacée par un champ magnétique :



d) Le déplacement du centre de pesanteur du système :

Souvent, l'efficacité d'un système mobile peut être augmentée par un changement contrôlé de son centre de gravité.

Exemples :

1. Le tracteur destiné à travailler sur des versants abrupts dispose d'un centre de gravité mobile (brevet № 508 427).
2. Un marteau creux, à l'intérieur duquel se déplacent librement le mercure, la grenaille ou autre (vers le manche lorsqu'on lève le marteau et vers la masse lors de la frappe), élimine facilement la contradiction suivante : le marteau doit être lourd pour frapper fort et doit être léger pour économiser les forces de l'ouvrier.
3. Le brevet № 354 784 présente un procédé de préparation de semences par granulage, c'est-à-dire en mettant les graines dans des granules, pour assurer l'ensemencement ultérieur des graines nécessitant une mise en place orientée vers le fond d'un sillon. Par exemple, pour des plantes bulbeuses, les graines sont placées dans des granules et ont un centre de gravité décalé par rapport à celui des granules. De plus, l'arrière des bulbes est disposé à proximité de la surface des granules. De ce fait, les bulbes sont plantés dans le sens voulu.

PROBLÈME 9. Tiré du livre de G. Bérégoï "L'angle d'attaque"⁶⁵ (édition "Molodaïa gvardia", 1971) : L'équilibre d'un avion dépend globalement de la position du centre de gravité et du centre de la pression aérodynamique, autrement dit, du point d'application des forces résultantes formées par la rencontre du flux d'air avec les surfaces des ailes, le fuselage et l'empennage. En régime de vol, ces deux centres sont

⁶⁵ Г.Береговой. Угол атаки. -М: "Молодая гвардия", 1971

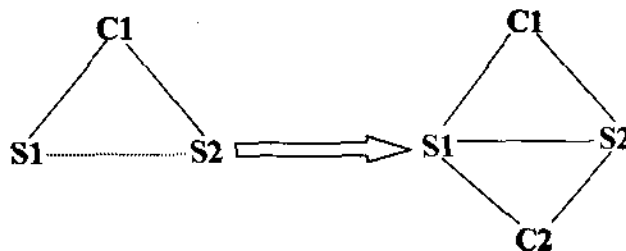
mobiles. Plus ils divergent, plus la réserve d'équilibre est importante. A l'inverse, lorsqu'ils se rapprochent, la réserve de l'équilibre diminue et quand ils coïncident, elle devient nulle.

Le paradoxe est le suivant : plus la réserve d'équilibre est faible, plus l'appareil est manœuvrable, mais en même temps, plus il risque de devenir incontrôlable.

Quelle loi faut-il appliquer pour que la réserve d'équilibre change au gré du pilote ?

4.7.3 Formation d'un vépole double

Si nous avons un vépole difficilement contrôlable dont il faut augmenter l'efficacité et si le remplacement des éléments de ce vépole est impossible, le problème se résout par la construction d'un vépole double en introduisant un second champ facilement contrôlable. La figure suivante illustre cette transformation de vépole.



Voici quelques illustrations de formation de vépoles doubles.

- Pour nettoyer des ampoules fortement encrassées, on les remplit d'une solution et on les agite (C_1), tout en créant le vide (C_2) autour d'elles. Alors le liquide de nettoyage à l'intérieur des ampoules entre en ébullition (brevet № 295 299).
- Afin d'améliorer l'adhérence des pneus à la route, on utilise non seulement le poids de l'automobile (C_1), mais aussi l'air chassé des reliefs de la bande de roulement ; le pneu semble ainsi coller à la route grâce au vide créé (C_2) (*Jeune technicien*⁶⁶, 1986, № 6, p. 46).

4.8. DEVELOPPEMENT INEGAL DES SYSTEMES

Sixième Loi : Les parties du système se développent inégalement : plus le système est complexe, plus le développement de ses parties est inégal.

Le développement inégal des parties du système est la cause de l'apparition de contradictions physiques et techniques et, par conséquent, des problèmes d'innovation.

Voici quelques exemples d'application de cette loi.

Une première illustration est la contradiction propre à l'électronique : la réduction de la taille des dispositifs électroniques est généralement limitée par les dimensions des éléments d'alimentation.

⁶⁶ *Юный техник*, 1986, №6, с.46

Vers le début du XX^e siècle, le défaut des lampes à filament de charbon a été définitivement identifié. Le filament de charbon se détériorait très vite et limitait la température de l'incandescence et la luminosité. Pour augmenter la FUP, il fallait un filament en métal réfractaire. A. Lodyguine est parvenu à réaliser un filament de tungstène et à présenter cette lampe électrique à Exposition Universelle de Paris en 1900. Cependant, à l'époque, les métallurgistes n'ont pas réussi à créer une technologie de fabrication de filaments fins de tungstène.

En Allemagne, on a breveté et mis en pratique une technologie de fabrication de filaments en autre métal réfractaire – le tantale ; on a réussi à organiser une production en série. Toutefois, aucun métal ne pouvait rivaliser en qualité (résistance, durée de vie) avec le tungstène. De ce fait, quelques décennies plus tard, la technologie de fabrication de filaments en tungstène a finalement été élaborée et toute l'industrie des lampes électriques est passée aux lampes à filament de tungstène.

Le changement d'une partie du ST conduit à une réaction en chaîne de solutions techniques. De ce fait, toutes les parties du ST subiront tôt ou tard des modifications.

Par ailleurs, notons que cette loi est vraie à chaque étape d'évolution d'un système technique :

Durant la période de croissance du ST, en raison de l'inégalité du développement, on résout les contradictions qui apparaissent en concevant de nouveaux sous-systèmes avec des fonctions utiles. Ainsi, le système accumule progressivement une multitude de sous-systèmes et accroît sa FUP.

Durant la période de décroissance du ST, on résout les contradictions en faisant disparaître les sous-systèmes. Leurs fonctions sont soit transmises aux systèmes voisins, soit sont remplacées par une substance idéale, programmée pour remplir la fonction accomplie auparavant par le sous-système ou par le ST.

Décrivons le mécanisme d'apparition des inégalités.

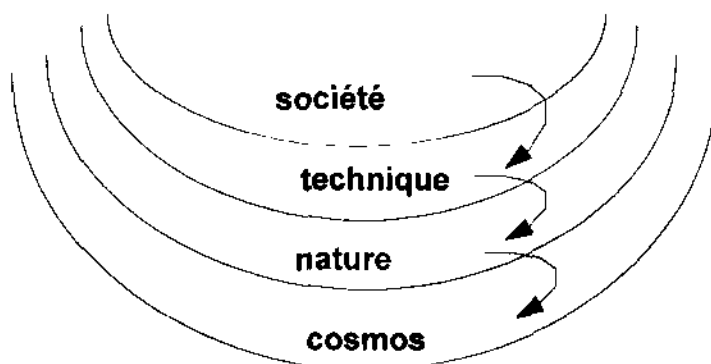
- La première phase est la naissance d'un besoin d'accroître la FUP,
- Pour accroître la FUP, il faut dans un deuxième temps renforcer une propriété d'un élément du système. Là commence la spécialisation de l'élément et la différenciation de ses propriétés dans le système. Cette phase peut être rapprochée du processus, qui est à l'origine de la technique, de distinction successive dans une mono-structure de ses différentes parties.
- La troisième phase fait apparaître une contradiction. En effet, le renforcement de certaines propriétés de l'élément conduit à ce qu'il ne soit plus en concordance avec les autres éléments.
- Dans la quatrième phase, cette contradiction se résout par l'apparition de nouveaux champs, de nouvelles substances, de sous-systèmes ou de substances idéales, ce qui permet d'atteindre un autre niveau de concordance entre les éléments du système. Cet état qui constitue un point d'équilibre peut s'assimiler à un bref instant d'harmonie dans la "vie" du système.

A titre d'illustration, faisons un parallèle entre l'évolution des systèmes techniques et la thermodynamique :

L'équilibre est une notion thermodynamique. Pour cette raison, une partie des principes de la thermodynamique (et de la synergie actuelle) pourrait très bien expliquer les processus du développement inégal de la technique.

Prenons pour exemple *le théorème d'Onsager* : la force motrice de tout processus est l'apparition de l'hétérogénéité dans le système. Un physicien américain, Lars Onsager, a formulé en 1931 un théorème valable uniquement pour les systèmes thermodynamiques ayant des gradients de température, de concentration des composants, de potentiels chimiques, etc. Le parallèle que l'on peut réaliser consiste à considérer les systèmes techniques comme des systèmes thermodynamiques non équilibrés. Ainsi, selon cette hypothèse, un ST possède toujours des parties qui se développent inégalement.

Le perfectionnement des ST est la conséquence de l'activité créative de l'homme. *La créativité consiste à augmenter le degré d'organisation et de contrôlabilité du monde extérieur (c'est-à-dire de point de vue de l'homme et de la société)*. L'évolution de la matière consiste ainsi en deux grands processus opposés : d'un côté, on assiste à l'évolution et à l'auto-perfectionnement de la substance animée et de l'autre, à la dégradation et à l'entropie de la substance inanimée.



Élimination progressive de la désorganisation

Le deuxième principe de la thermodynamique conduit à la constatation suivante : l'augmentation du degré d'organisation de la matière dans un endroit provoque aussitôt une augmentation du degré de désorganisation dans un autre endroit. Tout changement progressif engendre ainsi quelque part un changement régressif. La création est la cause de la dégradation dans une autre partie. Le renforcement des liens à l'intérieur des systèmes et la domination de facteurs générant la formation des systèmes (par exemple la créativité de l'homme) s'accompagnent de la destruction ou de la détérioration du fonctionnement d'autres systèmes.

Ainsi va la vie : accroître l'organisation à l'intérieur grâce à la dégradation à l'extérieur ...

4.9. TRANSITION DU MACRO-NIVEAU AU MICRO-NIVEAU

4.9.1. Formulation de la loi et principales voies de son application

Septième loi : Les organes de travail évoluent d'abord au macro-niveau, puis au micro-niveau.

Ainsi, on va passer d'un travail réalisé par des roues, des arbres et des roues dentées à un travail réalisé par des molécules, des atomes, des ions, des électrons, etc. Ces derniers sont alors plus faciles à contrôler par des champs à l'aide des effets physiques et chimiques.

Cette loi est vraie pour tout le processus d'évolution des ST. Comme nous l'avons déjà indiqué, l'essentiel de l'évolution consiste en une augmentation de la FUP des systèmes. Aux

premières étapes de l'évolution, cette tendance des innovateurs est relativement facile à réaliser au macro-niveau. En effet les dimensions et la puissance de fonctionnement des organes de travail des systèmes sont souvent augmentés.

La notion de macro-niveau correspond au niveau du monde perceptible par l'homme. Ce niveau englobe donc des objets de taille comparable à l'homme et dont il perçoit directement les propriétés. Les autres niveaux du monde, supérieurs ou inférieurs au niveau "humain", sont dissimulés et restent en dehors de la perception directe. Pour élargir la vision du monde réel, certains niveaux de connaissances, de pratique et d'imagination sont indispensables. Ce problème de perception constitue l'un des principaux types d'inertie psychologique et son franchissement est à la base de la créativité.

L'augmentation de la FUP par des modifications au macro-niveau, correspondant au développement des ST qui peut être qualifié d'extensif, s'épuise rapidement. Par ailleurs, l'augmentation de MDE (masse, dimensions, énergie) est limitée par les lois de la physique. Cette limitation rend la transition au micro-niveau inéluctable. Ainsi, on se dirige vers l'utilisation de niveaux systémiques inférieurs : on entre dans la substance. Ceci donne accès à des réserves supplémentaires d'énergie, permet de découvrir et d'utiliser de nouvelles propriétés qui étaient inconnues au macro-niveau, et d'appliquer des champs et des micro-particules de substance plus faciles à contrôler. Ainsi, l'augmentation de la FUP par l'accroissement du degré d'organisation des niveaux systémiques inférieurs de la substance est une voie unique de développement des ST qui peut être qualifié d'intensif.

Dans une démarche d'innovation par un processus d'essais et d'erreurs, la transition au micro-niveau commence généralement par la différenciation des propriétés, des zones et des fonctions du matériau constituant l'organe de travail du ST. Pour accroître la FUP, il faut qu'une partie de l'organe de travail soit pointue, une autre arrondie, une autre dure, une autre souple, etc. Dans certaines parties, on renforce les propriétés nécessaires et on passe d'une structure homogène à une structure hétérogène. On réalise ainsi une différenciation des fonctions : différentes parties de l'objet remplissent des fonctions différentes. Simultanément, on assure des conditions favorables pour que chaque partie isolée puissent accomplir au mieux ses fonctions. Cette différenciation des propriétés et des fonctions conduit à la division de la substance : par exemple une substance massive est remplacée par une substance en plusieurs couches, en fibres, puis par une substance constituée de particules. De plus, pour un fonctionnement commun au sein de l'organe de travail, les parties (couches, fibres, particules) sont agencées de façon à renforcer des fonctions utiles et à affaiblir des fonctions nuisibles. Ainsi, les contradictions techniques et physiques survenant au cours de développement des matériaux constituant le ST se résolvent par la transition au micro-niveau.

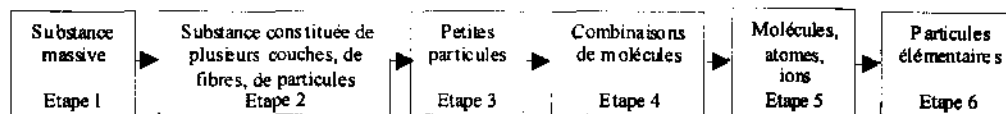
Il existe trois voies de transition du macro-niveau au micro-niveau :

- ❑ L'augmentation du degré de segmentation de la substance et la réunion des parties segmentées en un nouveau système.
- ❑ L'augmentation du degré de segmentation du "mélange" de substance et de vide (transition vers les matériaux capillairo-poreux).
- ❑ La substitution dans un système d'une partie matérielle par un champ (transition vers l'action "champ + substance", voire uniquement vers le champ).

Reprenons successivement chacun de ces modes de transition.

4.9.2. Augmentation du degré de segmentation de la substance et agencement des parties segmentées en un nouveau système

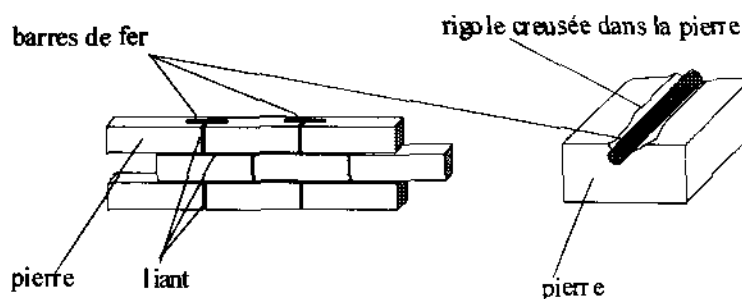
L'augmentation du degré de segmentation de la substance des organes de travail des ST peut être représentée par l'enchaînement donné sur la figure suivante.



Augmentation du degré de segmentation de la substance

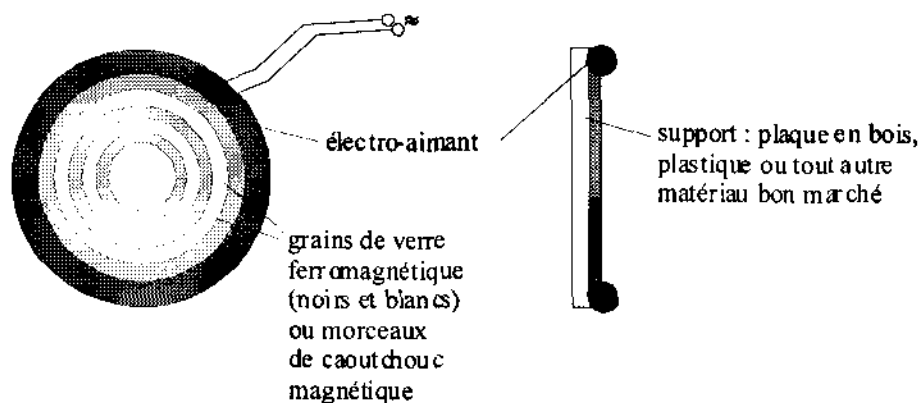
Illustrons cette segmentation par quelques exemples.

Étapes 1 à 2 : Dès l'Antiquité, l'homme a construit la première maison en torchis après avoir mélangé la terre argileuse avec de la paille ; il a ainsi obtenu une construction sûre et solide. A Babylone, on a associé l'argile avec le roseau ; en Grèce Antique, on plaçait des tiges de fer à l'intérieur des colonnes de marbre. Lors de la construction de l'église Basile-le-Bienheureux à Moscou, on a assemblé les plaques de pierre grâce aux barres de fer (prototype de béton armé). De nouveaux types de matériaux sont apparus : des matériaux en plusieurs couches (contre-plaqué, bimétaux, plastiques renforcés par des fibres de verre ou de carbone, métaux armés de diverses fibres, fibrobéton, béton armé).



Étapes 1 à 3 : Prenons l'exemple d'un dispositif destiné à fixer des pièces optiques, comme des lentilles dans un corps métallique, au moyen d'un élément intermédiaire. Pour augmenter la rigidité de la fixation, l'élément intermédiaire se présente sous forme d'une poudre qui remplit l'espace entre la pièce optique et le corps. Dans un dispositif identique à celui-ci, l'espace entre la pièce optique et le corps est étanche (brevet N° 647 628).

Un autre exemple de cette évolution est le brevet N° 1 068 693 : l'entraînement quotidien des tireurs à l'arc nécessite un grand nombre de cibles ce qui représente un coût important. Afin de remédier à ce problème, il a été créé une cible "inusable" constituée d'un aimant circulaire et de poudre ferromagnétique (grains de verre ferromagnétique ou morceaux de caoutchouc magnétique) qui se reconstitue à chaque utilisation.

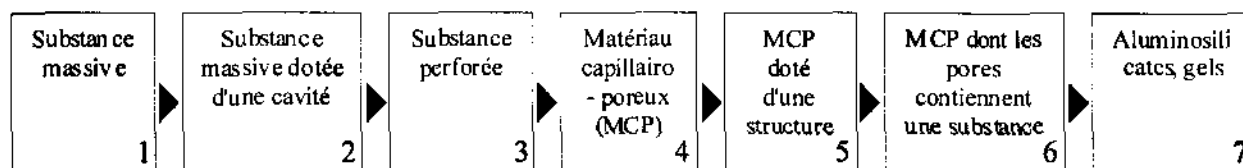


Étapes 1 à 4 : Pour nettoyer le canal d'une dent avant de faire un plombage, on utilise des fraises très fines. En effet, les canaux se rétrécissent dans la racine de la dent et il est impossible de nettoyer soigneusement le canal jusqu'au fond sans utiliser une fraise très fine. Mais, plus la fraise est fine, plus elle se casse. Son extraction est alors une opération délicate. Il faut résoudre ce problème. Si l'instrument se casse à certains régimes de fonctionnement et s'il est impossible de modifier ces régimes, alors il faut organiser d'une manière appropriée le fonctionnement de l'instrument "cassé". La poursuite de la résolution passe par la réponse à la question : "Qu'est-ce qu'une fraise "cassée" ? Le brevet № 1 266 190 propose d'augmenter le degré de segmentation de la matière en traitant le canal avec un liquide magnétique (de la poudre de fer désoxydé dans la chloramine) sur lequel on agit au moyen d'un champ électromagnétique alternatif d'une fréquence de 13 à 40 MHz.

Étapes 1 à 6 : Les balais d'un moteur électrique ont été d'abord constitués d'une substance massive, puis de fibres, de poudre, de combinaisons de molécules (liquide magnétique), de gaz ionisé et enfin d'un flux d'électrons dans le vide (voir 4.6.2).

L'étape 5 peut être complétée par la règle suivante : si l'on a besoin de particules de substance et qu'il est impossible de les obtenir ou de les introduire directement dans le système, alors on les obtient par décomposition d'une substance d'un niveau structurel supérieur (par exemple, les atomes à partir des molécules) ou par combinaison des particules d'un niveau inférieur (par exemple, les molécules à partir des atomes).

4.9.3. Augmentation du degré de segmentation du "mélange" de substance et de vide (transition vers un MCP)



Nous pouvons illustrer les étapes de la figure ci-dessus par les exemples suivants :

Étapes 1 à 4 et 7 : Evolution de la substance des pneus d'automobile : pneu en matière massive, pneu doté d'une cavité remplie d'air (chambre à air), pneu muni de plusieurs chambres à air (la cavité est divisée par des cloisons), pneus en matériau macro-poreux, pneus en matériau capillaire-poreux (MCP), pneus ayant une cavité remplie par des particules poreuses de polymère et par une substance sous forme de gel (brevet russe № 908 243).

Étapes 1 à 2 : Le soc d'une charrue s'est transformé en passant d'un état massif à un soc avec une cavité, puis à un soc perforé. Ceci a permis de faire passer à travers le soc un fluide, des engrais, des gaz d'échappement du moteur (en tant qu'engrais), ainsi que du courant électrique pour détruire les mauvaises herbes.

Étapes 1 à 2 : Il est également possible d'illustrer l'augmentation du degré de segmentation avec des systèmes vivants. En ce qui les concerne, il a fallu des millions d'années d'essais et d'erreurs avant que la nature produise des solutions techniques efficaces. Par exemple, il y a 80 millions d'années, avant de disparaître, les ammonites, mollusques céphalopodes à coquille enroulée, vivaient sur Terre. Ils étaient carnassiers et "sévissaient" dans les mers et les océans. Au début de leur évolution, ils étaient très lourds et portaient difficilement leurs coquilles massives. Mais, progressivement, dans la substance massive se sont créées des cavités remplies d'air. Puis ces cavités se sont transformées en constructions allégées à plusieurs compartiments (le corps du mollusque occupait le dernier compartiment habitable de la spirale). En fin de compte, ils sont devenus des appareils hydrostatiques assez performants : un siphon régulant la flottabilité traversait tous les compartiments.

Étapes 1 à 5 : Brevet № 435 829 : les dispositifs élastiques d'étanchéité destinés à rendre étanche les gants et les chaussettes des scaphandres lors des vols à haute altitude étaient composés de tubes circulaires élastiques remplis d'air saisissant le poignet. Il a été proposé d'y insérer une éponge de latex avec des pores ouverts. Lorsque la pression atmosphérique était normale, le dispositif ne fonctionnait pas et l'insert contenait une certaine quantité d'air. Si la pression de l'environnement baissait, l'air se libérait et la chambre gonflait jusqu'à égalisation de la pression. Dans ce cas, le MCP a été utilisé pour contenir le gaz.

Étape 5 : Les pores d'un MCP peuvent aussi contenir une autre substance que du gaz. Lors du fonctionnement des réacteurs de fusée, par exemple, certaines pièces atteignent parfois, voire dépassent, la température de 4 000 °C. Aucun matériau ne peut supporter de telles températures, le point de fusion de tungstène, le métal le plus réfractaire, étant 3 900 °C (la céramique ne convient pas à cause de fortes charges dynamiques). Dans ce cas, on remplit les pores de tungstène avec du cuivre qui, en s'évaporant, protège le métal.

L'atout le plus spectaculaire de la transition vers les MCP est la baisse de poids à solidité égale des constructions Ceci est particulièrement important car le poids est un paramètre des systèmes techniques qui, sur Terre, est bloquant pour leur évolution.

Pour illustrer ceci, on peut considérer l'exemple de la fabrication de miroirs optiques de diamètre supérieur à un mètre. L'utilisation d'un matériau massif a rapidement été difficile en raison d'une énorme dépense de travail et de l'impossibilité de stabiliser efficacement la température lors de l'échauffement unilatéral à cause d'une grande inertie thermique. Le passage à des constructions allégées a donc été nécessaire.

Généralement, ce type de miroirs est constitué de deux surfaces, dont l'une est polie, assemblées rigidement au moyen d'une carcasse à ailettes qui forme une structure constituée d'hexagones, de triangles ou de carrés réguliers. Il est possible d'alléger ces miroirs deux fois et demi à quatre fois par rapport aux miroirs massifs à taille et à rigidité identiques. On réussit à obtenir un poids de 300 kg pour un miroir d'un mètre de diamètre. Afin de baisser davantage le poids, l'Institut de la Physique de l'Académie des Sciences de Russie a créé des miroirs de taille importante en matériaux poreux. Ainsi un miroir d'un mètre de diamètre comprend un corps fabriqué en cuivre poreux, une surface supérieure polie en cuivre massif d'une épaisseur de 5 mm et une surface inférieure en acier inoxydable de la même épaisseur. Un tel miroir aura ainsi une épaisseur globale de 100 mm et un poids de 150 kg.

Le poids du cuivre poreux constituant le corps du miroir ne représente que 17 % du poids de cuivre massif d'un volume identique. La taille d'un pore élémentaire est de l'ordre de 1,5 mm.

A partir des métaux et de leurs alliages, on obtient des matériaux poreux ayant une porosité pouvant atteindre 98 %. La taille des pores varie de quelques dizaines de microns jusqu'à des dizaines de millimètres (*Lettres à JTF*⁶⁷, 1985, volume 11, № 22, pp. 1350-1354).

Étapes 1 à 6 : Les premiers moyens empêchant la propagation des incendies dans des conduites de gaz ou dans des gaines d'air étaient des parois coupe-feu à fentes métalliques, une couche de billes et même des caisses perforées contenant du sable. Dans ce cas la contradiction physique principale était la suivante : l'élément coupe-feu doit disposer de trous de taille importante pour laisser passer librement le gaz et de trous de taille réduite pour empêcher efficacement la propagation des flammes. En d'autres termes, un coupe-feu idéal ne doit être constitué pratiquement que de "trous" infimes avec des parois d'une épaisseur minimale. Dans le brevet № 262 822, on propose d'utiliser des MCP de fibres métalliques pressés. Pour baisser davantage la résistance hydraulique, il est recommandé d'utiliser un insert muni de trous d'un diamètre important, mais en appliquant un champ électrostatique (brevet № 369 913) – il permet d'augmenter trois fois le diamètre par rapport au diamètre critique.

La tendance à segmenter le vide peut être facilement illustrée par l'histoire de l'évolution des moyens destinés à renflouer des navires coulés (Hora Joseph N. *Remontée des navires coulés*⁶⁸. L. : Construction navale, 1985).

La méthode mécanique d'abord utilisée consistait à fixer sur le navire des câbles qui permettaient de le remonter à la surface. Cependant, il n'était pas toujours possible de mener à bien cette opération, car des tempêtes sur la surface de la mer et des courants sous-marins variables emmêlaient les câbles.

Une autre solution consiste à utiliser la force ascensionnelle des fluides plus légers que l'eau, notamment de l'essence, des composés d'ammoniac et d'autres. Le fluide serait pompé dans les cavités d'un navire coulé et chasserait ainsi l'eau. Toutefois à cause d'une force ascensionnelle insuffisante, les fluides ont été mis de côté et seuls les gaz (air) ont été utilisés par la suite.

Une autre solution sollicitée le plus consistait à utiliser des pontons : ils étaient noyés, attachés au navire sur les deux bords et remplis d'air comprimé. Les principaux défauts de ce procédé étaient :

- de graves difficultés pour attacher les pontons lorsque le navire se trouvait à une grande profondeur,
- la vitesse de remontée du navire : lorsqu'il a atteint la flottabilité, le navire peut remonter à la surface avec une telle vitesse que les pontons explosent en mille morceaux ou que l'air des pontons se libère. Le dernier effet s'explique par le fait qu'il est parfois extrêmement difficile d'arracher le navire du fond à cause de son adhérence avec le sol ou la vase.

D'autre part, de bons résultats ont été obtenus par utilisation de l'électrolyse : on branchait le corps du navire par un câble "plus" et on immergeait un deuxième câble "moins"

⁶⁷ *Письма в ЖТФ*, 1985, т.11, вып. 22, с.1350-1354

⁶⁸ Гора Джозеф Н. *Подъем затонувших кораблей*. Л.: Судостроение, 1985

à proximité du navire. Les bulles de gaz formées par la décomposition de l'eau détruisaient le lien nuisible du vèpole. Ainsi, l'adhérence avec le sol chutait jusqu'à zéro.

Enfin, on peut évoquer un dérivé du procédé "pontonnage" qui consistait à utiliser la flottabilité du navire lui-même. On rendait étanche minutieusement le navire et on le remplissait d'air comprimé. Pour ne pas étancher l'ensemble du navire (c'est-à-dire pour ne pas créer une seule grande cavité), l'évolution par la segmentation nous conduit à imaginer une multitude de petites cavités. Ainsi, a été proposée l'idée de remplir le navire par des balles de ping-pong, mais un simple calcul a démontré qu'elle était irréalisable, les balles explosant dès 4,5 m de profondeur. On a même analysé une idée d'utilisation de balles creuses en verre (un procédé coûteux et peu fiable).

En fait, la façon la plus simple de "fractionner" le vide est la formation de mousse. En 1964, pour remonter la péniche "Lamberjack" du fond de Golfe de Californie, on a utilisé pour la première fois du polyuréthane dur. Sur le navire de sauvetage se trouvaient deux réservoirs contenant les composants de polyuréthane et un agent moussant ayant une basse température d'ébullition. Au fond, a été installée une citerne de ce mélange à partir de laquelle un plongeur injectait le mélange sous pression dans les cavités de la péniche au moyen d'un tuyau équipé qu'un embout. Lors de la sortie du mélange, la pression baissait brusquement, l'agent moussant s'évaporait instantanément, il se formait un mélange de gaz et de polyuréthane qui durcissait en quelques minutes. Il fallait 0,9 kg de polyuréthane pour chasser 60,5 kg de l'eau de mer. La mousse obstruait automatiquement des trous de taille peu importante tels que les brèches et les hublots du navire coulé. C'est ainsi qu'il a fallu 27 tonnes de polyuréthane pour remonter une péniche pesant 500 tonnes. Il y avait toutefois un inconvénient : pour nettoyer les compartiments il fallait découper le polyuréthane durci, autrement dit, le fragmenter. Ainsi, la fragmentation préalable des mousses (leur transformation en granules) apporte à ce procédé une efficacité et une commodité d'utilisation plus importantes.

Une société hollandaise "Weismuller" spécialisée dans les opérations de sauvetage a mis en pratique un nouveau procédé de remontage des navires coulés. En 1965 un chalutier "Jako-Mina" d'un tirant d'eau de 108 tonnes a coulé six miles au nord-ouest du port hollandais de IJmuiden. Le navire, long de 27,4 m, s'était couché au fond sur son bord droit à 18 m de profondeur. Puisque les dimensions du chalutier ne permettaient pas au navire de sauvetage de le remonter au moyen des treuils, on a décidé d'utiliser des billes de polystyrène de la taille d'un petit pois et constituées à 98 % d'air et seulement à 2 % de plastique. Non seulement, les billes n'absorbaient pas d'eau mais encore, à la différence de l'air comprimé qui exerçait une pression uniforme dans toutes les directions, elles créaient un effort dirigé uniquement vers le haut. On a introduit 60 mètres cubes de billes à l'intérieur du chalutier en pompant un mélange de billes et d'eau par des tuyaux. Ceci a permis de remonter efficacement le chalutier. L'idée d'utilisation de granules de polystyrène a été énoncée pour la première fois par le Danois K. Kroyer. On peut noter qu'il existe un procédé similaire (brevet de la RFA N° 1 247 893 (1967)) : des objets flottants en mousse sont introduits à l'intérieur du navire coulé au moyen d'une pompe située sur le navire de sauvetage.

Pour conclure sur cet exemple, la segmentation a permis une extraction aisée du corps ajouté. En effet, l'extraction des granules du navire remonté s'effectuait au moyen de pompes destinées à décharger le grain, autrement dit, beaucoup plus facilement que l'extraction de polyuréthane. Par ailleurs, le polyuréthane est impossible à utiliser à des profondeurs supérieures à 90 mètres, car la mousse ne se forme pas faute de pression du gaz moussant.

Pour remonter une drague pesant plus de 1 000 tonnes en 1967 par la méthode de Kroyer il a fallu 27 tonnes de granules, ce qui est important. Survient alors le problème du

coût de transport des granules ? Une société hollandaise "V.A. Van den Tak" a utilisé une méthode basée sur l'utilisation de micro capsules pour remonter de 31 mètres de profondeur un navire de charge d'un tirant d'eau de 4,2 mille tonnes et dont la masse était 31 fois supérieure à celle de "Jako-Mina". Les granules de polystyrène (des embryons de granules – des micro capsules) de la taille de cristaux de sucre ont été introduits dans les compartiments du cargo par un flux d'eau sous pression à l'aide de tuyaux, puis les granules ont été chauffés par la vapeur d'eau. Ainsi, leur volume a augmenté 50 fois. Une installation portative produisant des micro capsules sur place peut être facilement amenée par un avion en tout lieu grâce à son faible poids.

Donc, les méthodes de renflouement des navires coulés ont évolué en utilisant :

- des corps massifs (remontage de navires coulés au moyen des câbles, sans chasser l'eau des compartiments intérieurs),
- des cavités d'une taille importante (pontons),
- une multitude de petites cavités (mousse durcie – polyuréthane),
- une mousse fragmentée – des billes, des granules en matériaux plastiques mousseux,
- des micro capsules – les embryons des granules de mousse.

L'ignorance de telles lois coûte cher à la société – des années passent avant que l'on découvre des solutions techniques progressives liées à l'utilisation de MCP et de leurs effets. Nous illustrons ceci ci-dessous avec l'histoire de l'élaboration, à l'Institut de la Physique générale de l'Académie des Sciences de Russie, de nouveaux types de miroirs pour des lasers puissants (*Science et vie*⁶⁹, 1985, №9, pp. 50-53).

Pratiquement pour tous les types de lasers, l'émission stimulée se produit dans un résonateur constitué au minimum de deux miroirs optiques dont un, semi-transparent, transmet le faisceau. Au début, on se contentait parfaitement des disques de quartz traditionnels dotés d'un revêtement réfléchissant. Cependant, ces dernières années, la puissance des lasers a augmenté des centaines, voire des milliers de fois et s'est alors posé le problème de la conception de miroirs capables de fonctionner sous l'action d'un rayonnement puissant. Ce problème est devenu la clef du perfectionnement des lasers puissants.

Même un miroir avec une surface optique très réfléchissante ne réfléchit pas entièrement le rayonnement. Environ 1 % de rayonnement est absorbé et transformé en chaleur ; mais quand il s'agit de lasers puissants, cela suffit pour créer des tensions thermiques dans les miroirs. Ces tensions déforment la forme géométrique de la surface réfléchissante, et il devient alors impossible de concentrer fortement le faisceau. De plus, les déformations thermiques interrompent l'émission stimulée qui est le principe fondamental du laser.

Les déformations thermiques ne doivent pas dépasser 5 à 10 % de la longueur d'onde du faisceau laser. Par exemple, pour le laser à gaz avec un rayonnement dans l'infrarouge (longueur d'onde 10,6 μm) les déformations ne doivent pas être supérieures à 1 μm . Il suffit de prendre un tel miroir dans la main pour que les déformations optiques dépassent la valeur limite et seulement à cause d'un échauffement irrégulier par la main. Cependant, cette déformation élastique est provisoire et reste réversible.

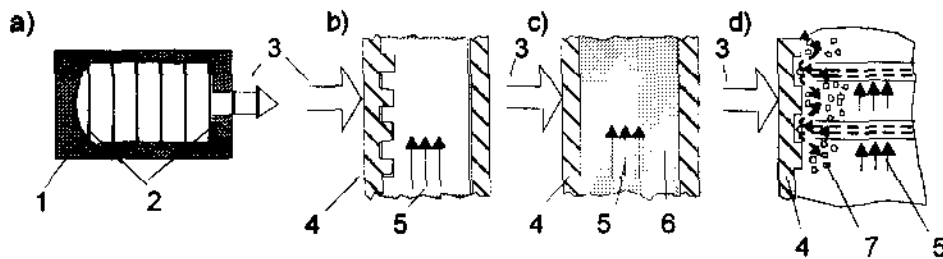
Avec de fortes puissances, le miroir va subir également des déformations plastiques qui sont irréversibles. Il sera alors définitivement détérioré.

⁶⁹ *Наука и жизнь*, 1985, № 9, с.50 -53

Il est nécessaire de concevoir des miroirs qui supporteraient des charges de longue durée allant jusqu'à plusieurs kilowatts sur un centimètre carré de surface. Un tel flux d'énergie est comparable au flux émis par une unité de surface du soleil. Si l'on pouvait imaginer de "poser" un miroir sur le soleil, sa forme ne devrait pas se déformer de plus d'un micron !

Pour résoudre ce problème, la démarche suivante a été adoptée.

Les physiciens ont raisonné très simplement : le quartz conduit difficilement la chaleur, donc, remplaçons le par un métal. Mais le métal n'est pas transparent, alors l'idée est venue de faire passer le rayonnement par un orifice au centre du disque (faire une sorte de métal semi-transparent), comme par le diaphragme d'un appareil-photo (fig. 21 a).



1 – résonateur, 2 – miroirs métalliques, 3 – faisceau de rayonnement laser, 4 – surface réfléchissante, 5 – milieu transporteur de chaleur, 6 – MCP, 7 – vapeur.

a) bloc de résonateur, on laisse passer le faisceau par un orifice dans le miroir,

b) miroir avec une structure canalisable, le flux du milieu transporteur de chaleur refroidit la paroi à ailettes,

c) le miroir se refroidit par le milieu transporteur de chaleur qui passe à travers un matériau poreux,

d) l'eau est amenée à la surface réfléchissante par les canaux, elle entre en ébullition, le mélange d'eau et de gaz s'éjecte dans le flux transversal du milieu transporteur de chaleur, se refroidit et sort en dehors du miroir.

Fig. 21. Conception d'un miroir pour un laser puissant.

Le disque métallique était un bon conducteur de chaleur, mais présentait également des défauts, notamment un coefficient élevé de dilatation et une faible dureté : il est alors difficile d'obtenir la même qualité de polissage que pour le quartz.

Remarque : cette solution de substitution de quartz par un métal était en dehors du champ de connaissances des opticiens et la rendait difficilement acceptable.

Ensuite la recherche s'est orientée sur la détermination de la meilleure combinaison de métaux et d'alliages. Pratiquement tous les alliages accessibles à l'utilisation de masse ont été mis à l'épreuve. Le résultat de cette recherche a permis d'augmenter 10 fois le seuil de la capacité de travail optique. Malgré cela, les charges lumineuses et, par conséquent, les charges thermiques continuaient de croître (augmentation de la FUP). La conductibilité d'un métal ne pouvait plus assurer l'évacuation d'un flux important de chaleur. Il fallait donc trouver une solution plus performante.

Dans ce cas, le refroidissement, en d'autres termes, l'évacuation forcée de chaleur par un fluide en mouvement, est indispensable. Lors de ce processus, la quantité de chaleur évacuée est directement proportionnelle à la différence de température entre le corps chauffé (le miroir en l'occurrence) et le fluide de refroidissement. Les calculs ont montré que le problème serait résolu si cette différence était supérieure à 1 000 °C. Donc, le miroir doit avoir une température d'environ 1 000 °C. Cependant une telle température est inadmissible pour le miroir métallique, car elle ne permet pas d'assurer une bonne qualité de la surface optique. On est donc face à une contradiction : pour évacuer la chaleur d'une manière

optimale, la température doit être élevée, alors que pour assurer une meilleure stabilité de la forme géométrique et pour d'autres propriétés optiques du miroir, la température doit être de l'ordre de la température ambiante.

Etant lisse, surface arrière du miroir n'évacue pas suffisamment la chaleur. Pour augmenter la surface de transfert de chaleur, on a creusé des sillons par lesquels on a fait passer l'eau. Pour accélérer le processus d'évacuation de la chaleur, on a rendu les parois des canaux très fines. Mais, elles tremblaient et se déformaient à cause des vibrations produites par la circulation de l'eau. La contradiction a été résolue par le passage aux MCP.

Les MCP apportaient ici une réponse particulièrement intéressante à ce problème. En effet, ils ont une grande surface de cession de chaleur, un bon mélange du fluide refroidissant circulant dans les capillaires, une tenue mécanique élevée – une matrice-squelette qui tient solidement la surface réfléchissante et qui maintient sa géométrie. On couvre un MCP par une couche réfléchissante, on le polit et il devient un miroir. L'épaisseur du revêtement ne doit pas dépasser 100 à 500 μm , sinon il retiendra la chaleur. Il existe divers procédés de revêtement, par exemple, au moyen de réactions chimiques de transport en phase gazeuse, c'est-à-dire un assemblage d'atomes. Cela signifie que la surface sera au départ très lisse (des aspérités inférieures à 0,1 μm) et qu'après le polissage, les irrégularités seront de l'ordre du millièème de micron (10^{-9} m).

Lorsque l'on cherche à augmenter davantage la FUP, la température continue de monter et on retrouve notre problème. Donc, il faut accroître la vitesse du porteur de chaleur de manière à ce que les molécules du fluide "volent" au lieu de "couler". Pour le faire, on doit résoudre la contradiction suivante : pour une meilleure absorption de chaleur, l'agent doit être fluide (les fluides possèdent une capacité thermique élevée), alors que pour un afflux et reflux à grande vitesse, il doit être gaz. La transition de phase (lors de l'absorption de chaleur, il est fluide, lors de l'évacuation, il est gaz) est une réponse. Ainsi, le fluide doit bouillir, s'évaporer et quitter précipitamment la zone d'échauffement. Pour améliorer l'ébullition, l'échauffement s'effectue à basse pression d'air (les molécules d'air ne gênent pas le mouvement de la vapeur). On pense alors au tuyau thermique ! En tant que fluide, on utilisait un métal en fusion qui, en s'évaporant, évacuait des quantités de chaleur suffisamment considérables. Mais la vitesse de la vapeur peut atteindre au maximum la vitesse du son.

Pour ces miroirs, on a obtenu une intensité d'évacuation de chaleur très élevée – plusieurs dizaines de kilowatts au centimètre carré. En principe, elle peut atteindre une centaine de kilowatts.

Et ensuite ? L'accroissement de la FUP est un processus impossible à stopper. Comment évacuer une puissance de 1 000 kW/cm² ? Ou bien 10 000 kW/cm² ? !

Avec une telle puissance, l'épaisseur d'une paroi doit être quasiment inexistante (1 μm , 0,001 μm ...), c'est-à-dire qu'elle doit être absente. Quant au miroir, à une température de 1 000 °C, il disparaîtra également, en devenant gazeux (par exemple à l'état de plasma). Si l'on considère le résultat idéal final, le miroir doit être absent mais sa fonction doit être remplie. Le champ (le faisceau laser, le rayonnement électromagnétique) doit se créer lui-même un miroir qui doit être toujours liquide (ou gazeux) avec une surface qui se renouvelle constamment. La limite physique suivante (après la vitesse du son) est la vitesse de la lumière. Si l'on réussit à évacuer la chaleur avec une telle vitesse, la puissance du laser pourrait croître davantage.

En concluant ce chapitre il faut noter une particularité étonnante de la transition vers les MCP : quels que soient les facteurs qui avancent l'évolution des systèmes techniques, que ce soit le poids (télescopes), la force ascensionnelle (anti-poids pour remonter des bateaux) ou

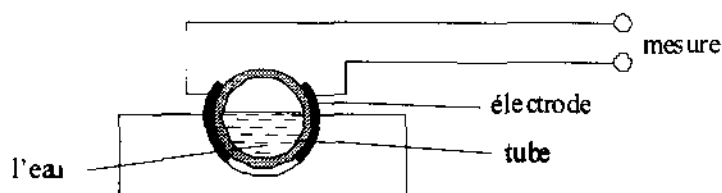
une température élevée (miroirs des lasers), le résultat d'évolution est le même : il faut qu'apparaissent dans le système des matériaux poreux et capillairo-poreux.

4.9.4. Substitution des parties matérielles d'un système par des champs.

A toute étape de la segmentation de la substance ou du "mélange" de substance et de vide peut survenir un obstacle empêchant de passer à l'étape suivante d'évolution, notamment il est possible que la substance nécessaire n'existe pas ou qu'une partie (propriété) du système se dégrade brusquement ou encore que les lois de la nature ne permettent pas ce passage. Dans ce cas, il est possible d'augmenter la FUP *en remplaçant une partie du système* :

- ❑ par une substance susceptible, en interaction avec un champ, d'accomplir les actions requises
- ❑ ou bien par le champ lui-même, sachant que les substances présentes dans le système ou dans l'environnement peuvent être en même temps une source de champ.

La demande de brevet international PCT⁷⁰ N° 82/01 071 décrit un procédé de mesurage de la pureté d'eau dont le principe est le passage de l'eau dans un tube isolé entre les électrodes pour mesurer la force électromotrice triboélectrique générée par le flux.



Le brevet N° 504 982 décrit un instrument de contrôle du niveau de liquide, généralement de carburant, qui comprend un flotteur muni d'un contact, un corps avec un autre contact isolé et un indicateur dans le circuit duquel sont inclus les contacts ci-dessus. Pour exclure la source d'alimentation de ce circuit et pour prévenir une éventuelle formation d'étincelles sur les contacts, ces derniers sont fabriqués en matériaux hétérogènes, par exemple du cuivre et du constantan, formant lors d'un court circuit une jonction froide de thermocouple, alors que l'autre jonction située en dehors de l'objet de contrôle est pourvue d'une source de chauffage.

Si un système ne comporte pas de substances – sources de champs, alors il faut utiliser un champ extérieur contenu dans l'environnement ou un champ introduit spécialement.

L'utilisation de champs extérieurs (vent, radiation solaire, champs électrique et magnétique terrestres, ondes électromagnétiques, etc.) a servi de base à un grand nombre d'innovations. Par ailleurs, plus les dimensions des particules dans un système sont faibles, plus l'action des champs est efficace, en d'autres termes, meilleur est le niveau de contrôle des particules.

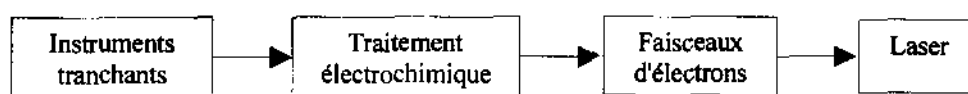
Le brevet N° 141 713 décrit un procédé de fabrication de pièces de différentes configurations à base de faisceau plasma. On introduit une électrode dans un brûleur à plasma

⁷⁰ PCT – abréviation de *Patent Cooperation Treaty*

à haute température. Entre l'électrode (anode) et la bouche du brûleur (cathode), on produit un arc électrique de densité élevée. Le matériau de l'électrode s'évapore et est entraîné par le flux de gaz inerte (par exemple hélium ou argon) dans la zone d'action des électroaimants. Dans cette zone, un champ électromagnétique comprime le faisceau de plasma en un fil fin. Le plasma est d'abord focalisé par une lentille électromagnétique et est ensuite déposé sur un écran spécial. Deux systèmes magnétiques déflecteurs dirigent le faisceau de plasma en le déplaçant sur l'écran. Le métal se dépose sur l'écran constamment refroidi et prend toute forme voulue.

Dans le brevet N° 339 397, un outil destiné à découper le bois sans copeau comprend un support et un organe de travail muni d'un outil tranchant. Pour accroître la productivité et la qualité de découpage, l'outil tranchant, dont les deux biseaux supérieurs sont aiguisés, est en matériau magnétostrictif et est relié par des transformateurs électromécaniques à un transformateur à haute fréquence.

Ceci constitue un exemple de la transition d'un instrument du macro-niveau au micro-niveau par le remplacement de la substance par un champ.



Procédés de traitement de matériaux

Si le système ne contient pas de substances – sources de champ et s'il est impossible d'utiliser les champs extérieurs, alors il faut inclure dans le système des substances susceptibles de devenir source de champ.

Le brevet N° 575 114 expose un procédé d'extraction de micro-organismes et d'autres substances difficilement dissociables des milieux liquides par un champ centrifuge. Selon ce brevet, pour que l'extraction soit plus complète, on ajoute dans le liquide des substances adsorbantes qui ne se dissolvent pas et qui ont un poids spécifique élevé.

On obtient souvent des champs en introduisant dans le système des substances capables des transitions de phase du premier et du deuxième niveau (par exemple des substances se comprimant et se dilatant, bimétal, alliage de nickel (55 %) et de titane (45 %)). Un grand nombre d'innovation, notamment dans les domaines du formage des pièces métalliques, de la soudure par diffusion ou encore pour embrancher les tuyaux, est basé sur la transition eau – glace ou eau – vapeur.

4.10. TRANSITION VERS LE SUPER-SYSTEME

4.10.1. Formulation de la loi et principales voies de formation des super-systèmes

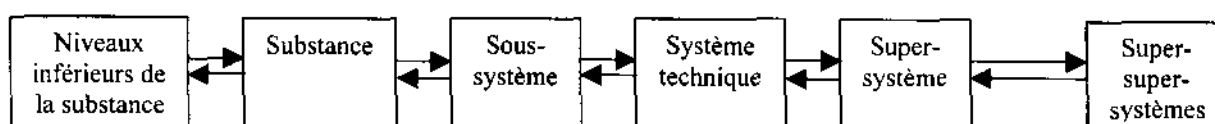
Huitième loi : L'évolution d'un système qui a atteint sa limite peut continuer au niveau du super-système.

Voici une des voies de cette transition : *des systèmes techniques se réunissent et forment des bi-systèmes et des poly-systèmes.*

La réunion des systèmes en un super-système comporte quelques avantages :

- certaines fonctions des systèmes se transmettent à un super-système (par exemple, la réparation de téléviseurs de marques différentes se fait dans le même atelier) ;
- certains sous-systèmes sortent du ST et, après s'être réunis en un seul ST, deviennent une partie du super-système (antenne collective au lieu des dizaines d'antennes individuelles),
- les systèmes réunis en un super-système acquièrent de nouvelles fonctions et propriétés (télévision câblée de haute qualité à partir d'une antenne de village à laquelle s'ajoute la possibilité d'organiser une liaison vidéo au moyen de ces mêmes câbles).

Les bi- et poly-systèmes résultant de cette réunion poursuivent généralement leur évolution soit "vers le haut", par la formation de super-systèmes encore plus importants, soit "vers le bas", par la réduction de plusieurs systèmes en un seul, voire en une substance idéale. Ce processus bilatéral allant dans les deux sens peut être représenté comme suit :



Il est possible d'établir un parallèle entre l'évolution des systèmes techniques et l'évolution de la vie sur Terre. Au départ, on observe une réunion d'organismes vivants avec une croissance du point systémique : "cellule – organisme – population – écosystème – biosphère". Puis vient l'étape où chaque élément vivant cumule une multitude de fonctions : par exemple, une feuille remplit les fonctions du convertisseur d'énergie solaire en énergie chimique, de la pompe qui maintient la pression dans les capillaires, du régulateur de température, de la réserve d'éléments nutritifs ; ou encore le foie accomplit plus de 20 fonctions. Enfin, on assiste à la transformation des systèmes ayant une fonction utile en une substance idéale. Ainsi le système de transmission de l'information génétique, qui fonctionnait initialement au niveau cellulaire, s'est "réduit" ensuite en appareil génétique. Mais ce parallèle a des limites qui peuvent être illustrées par un exemple d'un biologiste américain, K Sagan : "Chacun des "Vikings" – appareils spatiaux qui ont atterri sur Mars en 1986 – possédait dans ses ordinateurs des instructions préalablement programmées de plusieurs millions de bits. Ainsi, "Viking" était doté d'une "information génétique" quelque peu plus importante qu'une bactérie, bien que considérablement plus réduite que des algues." (*Les dragons d'Eden*⁷¹, M.: Znanié, 1986, p. 28)

En effet, la complexité, la précision et l'efficacité de fonctionnement d'une bactérie peuvent être comparées, par exemple, à celles d'un robot spatial "Viking", alors qu'une cellule "normale" d'un organisme vivant devrait être comparée probablement à une usine de montage de ces robots. Ainsi, seuls des organismes très anciens ou encore certains sous-systèmes rudimentaires d'animaux existants pourraient être considérés comme prototypes de la technique moderne. Donc, il est trop tôt de parler d'une analogie entre les lois biologiques et les lois techniques. Pour le moment, elles n'ont en commun que quelques traits propres à l'évolution de tout système.

La loi de **transition vers le super-système** fait partie de ces lois communes. Nous analysons ici les particularités essentielles de sa manifestation dans l'évolution de la technique (fig. 22).

⁷¹ *Драконы Эдема*, М.: Знание, 1986, с.28

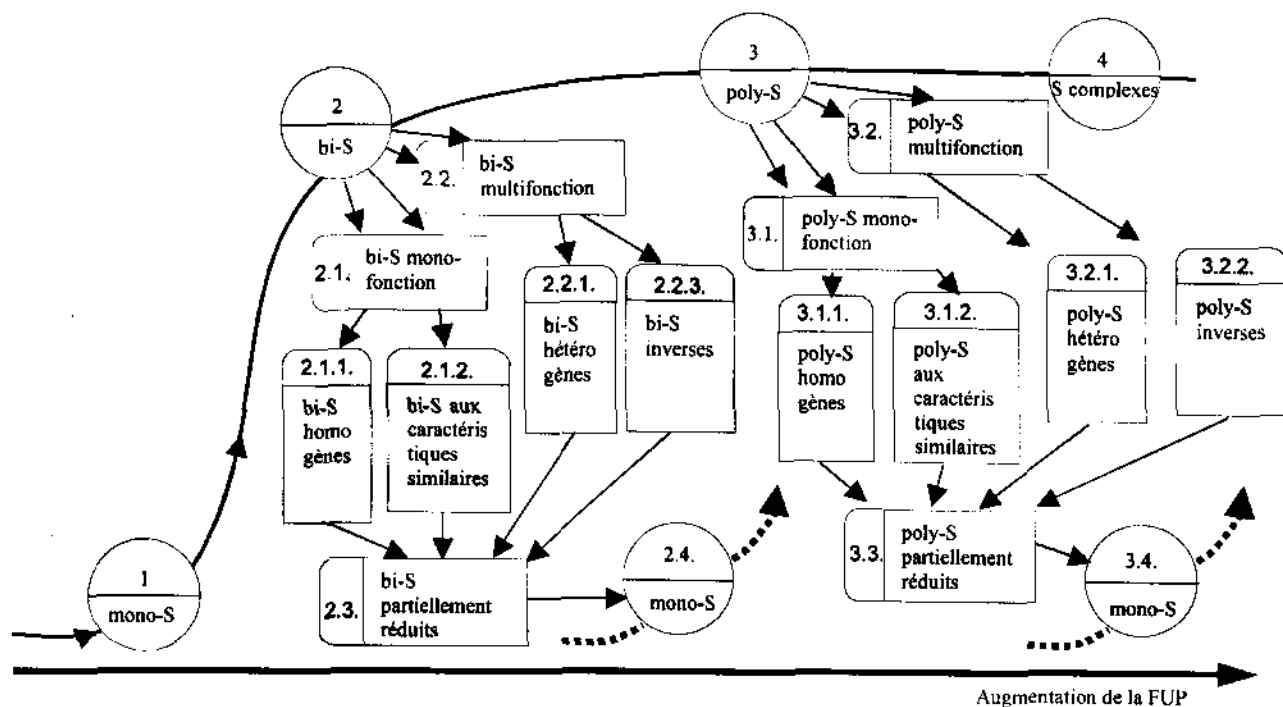


Fig. 22. Un des mécanismes de la transition vers le super-système – transition "mono-bi-poly".

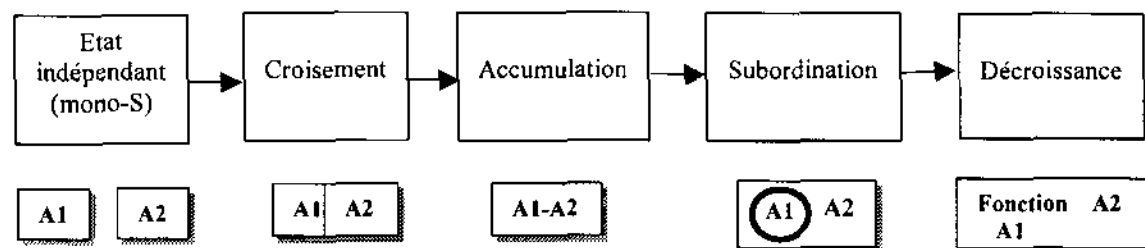
Le système unique initial (**mono-système**) se dédouble et forme un **bi-système** (bi-S) ou un **poly-système** (poly-S) lorsqu'il se réunit avec d'autres sous-systèmes. Non seulement des systèmes semblables (*homogènes*) peuvent se réunir, mais également des systèmes avec des caractéristiques légèrement différentes, des systèmes hétérogènes (systèmes avec des fonctions différentes) et des systèmes avec des fonctions opposées. Dans tous les cas, la réunion suit les mêmes étapes.

La **transition mono-bi-poly** est possible à toute étape d'évolution et fonctionne à tout niveau de hiérarchie des ST que ce soit super-systèmes, sous-systèmes ou substance.

Lors de la formation des bi-systèmes et des poly-systèmes, on peut observer des changements qualitatifs de trois paramètres : *les propriétés, les liens et le milieu intérieur*. Cela constitue l'essentiel de la transition mono-bi-poly : des changements quantitatifs, notamment la réunion des systèmes, sont justifiés uniquement en cas d'apparition de nouvelles propriétés.

4.10.2. Formation et évolution des bi-systèmes

La formation et l'évolution des bi-S peuvent être présentées comme suit :



Lors de la formation d'un bi-système, on voit naître une nouvelle propriété (un sur-effet, une propriété supplémentaire inattendue) qui apparaît uniquement dans le système réuni

et qui est le signe le plus important que la transition mono-bi-poly a été effectuée correctement.

Par exemple, le couteau (mono-système) possède un certain nombre de propriétés, alors que le ciseau (couteau + couteau = bi-système) acquiert une nouvelle qualité que deux couteaux pris séparément n'ont pas.

Si l'on assemble une plaque métallique avec une autre plaque ayant un coefficient de dilatation linéaire différent de celui de la première, alors on obtiendra une plaque bimétallique (bi-système avec des caractéristiques légèrement différentes) dotée d'une nouvelle propriété : fléchir sous l'action de la chaleur. Si l'on assemble des plaques ayant des coefficients opposés (négatif et positif) de dilatation linéaire, on obtiendra un bi-système inverse doté d'une nouvelle propriété : un coefficient de dilatation linéaire nul.

L'apparition d'avions rapides blindés⁷² a conditionné le développement d'un autre système opposé : l'utilisation de balles perforantes d'un calibre 7,62 et 12,7 mm. Cela a provoqué une nouvelle contradiction : pour protéger l'avion de ces balles, il fallait un blindage d'une épaisseur de 15 et 35 mm pesant respectivement 120 et 280 kg/m². L'avion équipé d'une telle carapace ne pouvait pas atteindre la vitesse requise. Cette contradiction a été résolue par une transition vers le bi-système : le blindage a été réalisé en deux feuilles de tôle séparées par un espace d'air. La balle, après avoir percuté la première tôle, se mettait à culbuter et parfois se brisait contre les bords asymétriques de la brèche qu'elle venait de faire. Derrière la première tôle suivait la deuxième que la balle ne pouvait plus traverser (*Technique et science*⁷³, 1986, № 1, p. 47).

En 1921, L.S. Terman, en concevant un instrument électrique de musique, a rencontré une contradiction technique suivante : l'instrument devait générer des sons dans un diapason audible de fréquences, mais dans ce cas il bourdonnait durant les pauses et avant le jeu. Il est peu commode d'utiliser sans cesse l'interrupteur. Terman a trouvé une solution ingénieuse : il a créé un bi-système avec des caractéristiques légèrement différentes. Son installation comprenait deux générateurs à haute fréquence (par exemple, 100 et 102 kHz – les fréquences imperceptibles par l'homme) et un détecteur qui distinguait la différence entre ces fréquences (2 kHz dans un diapason audible), en outre, cette différence était détectable uniquement au moment du jeu.

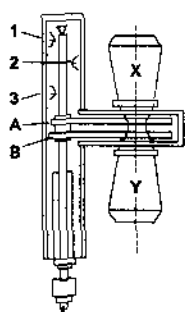
Augmenter la vitesse avec laquelle se déplace l'organe de préhension d'un robot nécessite un système efficace de freinage indispensable afin que le préhenseur ne heurte pas son environnement à la fin de son mouvement. Il existe un système de freinage très simple : au moment de freinage, le préhenseur exerce une pression sur un piston qui expulse de l'huile par une fente étroite, ce qui réduit l'énergie cinétique. Cependant, ce système comporte un défaut majeur : peu de temps après, l'huile s'échauffe, sa viscosité baisse et il passe par la fente sans résistance particulière rendant ainsi le système moins efficace. Selon le brevet américain № 3 791 494, la fente est réalisée sous la forme d'un bi-système auto-contrôlable avec des caractéristiques légèrement différentes : elle est formée par deux éléments ayant des coefficients de dilatation thermique différents qui, lorsque l'huile s'échauffe, réduisent d'eux-mêmes la surface de la fente. Ainsi la résistance globale reste inchangée.

⁷² Cette contradiction a été brillamment résolue par S.V. Ilyuchin qui a proposé d'utiliser le blindage en tant qu'élément de la construction portant la charge.

⁷³ *Техника и наука*, 1986, № 1, с.47

Illustrons, sur un autre exemple, l'apparition d'une nouvelle propriété à la suite d'une réunion parallèle de deux systèmes homogènes avec des caractéristiques légèrement différentes : deux moteurs électriques pour la transmission d'une perceuse.

Des perceuses automatiques traditionnelles nécessitent un réglage de l'avance lorsque le diamètre, le matériau ou la vitesse de rotation d'un forêt changent. Une société anglaise a conçu une perceuse qui sélectionne d'elle-même l'avance requise en fonction de ces paramètres et qui ne nécessite pas de réajustement quand le type de pièces à percer change (fig. 23).



1, 2, 3 – micro-interrupteurs ; A, B – roues à courroies ; X, Y – moteurs électriques.

Fig. 23. Schéma d'une perceuse automatique.

La perceuse (fig. 23) est constituée d'un arbre fileté, de deux roues à courroies, dont chacune est reliée à un moteur électrique autonome par une courroie de transmission, et d'un ensemble de micro-interrupteurs de commande. En se mettant en rotation, la roue A fixée rigidement sur l'arbre fileté actionne ce dernier. La roue B est montée sur le filetage de l'arbre et se présente sous forme d'un écrou qui transmet à l'arbre le mouvement de va-et-vient. Les moteurs électriques X et Y liés respectivement par des courroies aux roues A et B tournent dans le même sens, la vitesse de rotation du moteur Y étant inférieure de 20 %. Les micro-interrupteurs 1, 2 et 3 contrôlent le déplacement de l'arbre.

Au départ, le moteur X qui assure l'avance du forêt vers la pièce grâce à la rotation de l'arbre dans la roue-écrou immobile B se met en action. L'interrupteur 2 actionne le moteur électrique Y. L'écart de vitesses de rotation des roues A et B génère la baisse de la vitesse de l'avance du forêt jusqu'au cinquième de la vitesse initiale.

Au moment où le forêt touche la pièce, la vitesse de rotation du moteur X baisse, alors que la vitesse du moteur Y reste constante. La diminution de la différence entre les vitesses des moteurs réduit l'amplitude de l'avance jusqu'à ce qu'elle soit telle que le moteur X possède encore une force suffisante pour maintenir cette vitesse. La correspondance entre le moment de torsion et la vitesse de l'avance assure des conditions optimales de perçage.

Si au cours du fonctionnement, le forêt est obstrué par des copeaux et que sa vitesse baisse de plus de 20 %, la roue B commence à tourner plus vite que l'arbre fileté qui se retire automatiquement ce qui évacue les copeaux du forêt. Le contrôle global de la perceuse est réalisé par un microprocesseur.

Les têtes de forêt avec l'avance réglée automatiquement se sont avérées particulièrement performantes pour le perçage des pièces ayant des cavités intérieures ou composées de couches de matières différentes. Le temps d'usinage de telles pièces a été divisé par cinq (*Inventeur et innovateur*⁷⁴, 1984, № 3, p. 28).

⁷⁴ *Изобретатель и рационализатор*, 1984, №3, с.28

La formation de bi-systèmes hétérogènes est plus efficace que la formation des bi-systèmes homogènes. Les bi-systèmes homogènes remplissent toujours une seule fonction, alors que les bi-systèmes hétérogènes en remplissent deux. Par exemples une tétine – thermomètre, un sèche-cheveux – stéréo (dans les salons de coiffure un casque pour sécher les cheveux avec des écouteurs intégrés).

Cependant, toute union de systèmes hétérogènes en un seul système ne donne pas systématiquement de nouvelles propriétés.

On peut citer quelques exemples pour étayer ce point, on a ici des brevets pour des améliorations qui n'ont rien d'innovantes mais apportent uniquement un gain matériel :

- le brevet № 71 918 présente une trousse avec un dispositif de multiplication sous forme de table de Pythagore ;
- le brevet № 74 300 présente un verre pour les crayons avec un calendrier ;
- le brevet № 577 142 présente un crayon combiné avec un compas,
- ou encore un brevet comme une lampe de chevet avec une horloge, etc.

Ces innovations n'ont rien de fondamentalement innovant, mais correspondent à une simple économie de matériaux.

L'exemple suivant (brevet № 1 227 511) décrit également une simple combinaison mécanique d'éléments ayant des fonctions opposées en un bi-système sans faire apparaître une nouvelle propriété : un crayon mécanique combiné avec un dispositif gommant fixé sur son extrémité au moyen d'une charnière (charnière pour une commodité d'utilisation).

Notons qu'à la fin du XIX^e siècle aux Etats-Unis a été annulé un brevet délivré pour un crayon avec une gomme à l'extrémité. Le tribunal a jugé l'innovation brevetée comme une simple agrégation d'éléments (crayon et gomme) connus auparavant, car ils n'interagissaient pas et car leur combinaison donnait un effet sommaire et non pas un effet qualitativement nouveau (*Inventeur et innovateur*⁷³, 1979, № 8, p. 39).

Processus d'apparition d'une nouvelle propriété dans un bi-système :

Il faut réunir les systèmes de sorte que "l'arrimage" de propriétés des éléments s'effectue dans les deux sens : une partie des propriétés doit s'additionner et se renforcer, l'autre partie doit s'atténuer, se déduire, se neutraliser. Ainsi, le renforcement passe au premier plan, devient dominant et joue le rôle principal dans la "vie" du nouveau système. La nouvelle propriété peut provenir de la combinaison (de l'interaction) de propriétés neutres ou inaperçues auparavant, dans ce cas son apparition devient encore plus inattendue.

Illustrons ceci sur un exemple élémentaire : le barrage d'un ruisseau à l'aide de briques.

Imaginons que nous avons besoin de barrer un ruisseau à l'aide de briques. Le tas de briques que nous avons n'est pas encore un système. On place une brique sur son côté long au travers du ruisseau. L'eau contourne la brique des deux côtés. Dans ce cas, les côtés courts sont ces propriétés nuisibles dont nous n'avons pas besoin en ce moment. Pour les éliminer nous ajoutons encore deux briques de chaque côté et les côtés "nuisibles" disparaissent ! Il y a un instant trois briques avaient six côtés courts et tout à coup il n'y en a eu que deux, alors que quatre autres côtés se sont neutralisés. Par ailleurs, la propriété utile (barrer le cours d'eau) s'est renforcée, car les propriétés dont nous avons besoin se sont additionnées.

⁷³ *Изобретатель и рационализатор*, 1979, № 8, с.39

Une telle "addition – soustraction" de propriétés utiles et nuisibles caractérise les bi- et poly-systèmes homogènes. Mais cet effet systémique se manifeste bien plus encore lors de la création de systèmes ayant des propriétés opposées. Par exemple le béton armé est un bi-système typique où l'armature en acier assure la distension et le béton assure la compression, c'est-à-dire les propriétés positives se complètent, alors que les propriétés négatives se neutralisent – le béton protège l'acier de la corrosion et l'acier ne laisse pas le béton se désintégrer.

Dans certaines usines, on rencontre la situation suivante : certains tuyaux conduisent un fluide alcalin qui laisse sur les parois un dépôt, d'autres tuyaux conduisent un fluide acide qui attaque progressivement les parois. La combinaison des tuyaux en bi-système s'impose d'elle-même. Dans le brevet № 235 752, on propose de faire passer alternativement dans les tuyaux tantôt un acide, tantôt un alcalin. Ainsi, l'acide détruit le dépôt, alors que l'alcalin crée une couche de protection.

Dans le brevet № 950 241 il est proposé de réaliser une serre en deux parties, l'une avec un plafond transparent, destinée aux plantes qui dégagent de l'oxygène, et l'autre – obscure – pour des plantes qui dégagent du gaz carbonique. La nouvelle propriété résultant de cette transformation en bi-système est la suivante : les gaz circulent d'un compartiment à l'autre tout seul sans ventilateur, par ailleurs, si l'on respecte une certaine proportion entre les plantes dans les compartiments, il serait possible de réaliser une serre parfaitement hermétique (par exemple, pour des stations spatiales). Il est également possible de réunir une serre avec un immeuble habitable : le gaz carbonique et la chaleur iront dans la serre et l'air enrichi en oxygène ira dans les locaux.

Dans le brevet № 728 941, il est proposé un rouleau servant à appliquer la peinture dont les fibres sont réalisés en deux matériaux hétérogènes transmettant aux particules de peinture des charges d'électricité statique de signes opposés. Les particules adhèrent mieux entre elles en formant ainsi une couche homogène. Le revêtement est, par conséquent, d'une meilleure qualité.

Dans le brevet № 1 260 570, il est présenté un dispositif de fixation doté d'une indication de serrage comme indiqué dans le brevet № 46 384, mais il s'en dissocie du fait que, pour simplifier le mesurage des forces de serrage et le contrôle de leur variation dans le temps, le dispositif possède un élément supplémentaire d'affichage sous forme d'une plaque-capturateur en matériau optiquement actif. Cet élément se situe sous un polaroïd et est lié à l'élément central par une couche intermédiaire en matériau élastoplastique. Par ailleurs, il a une image interférométrique d'un signe opposé à l'image interférométrique de l'élément central correspondant au couple de serrage donné.

Dans le brevet № 615 927, il est présenté un procédé d'observation et de protection pendant la soudure et le découpage pour des opérations réalisées manuellement. On place les réflecteurs de manière à ce que leurs surfaces verticales soient l'une en face de l'autre et on décale leurs foyers. Pour améliorer la sécurité de travail du soudeur, on dispose un des réflecteurs sur le casque du soudeur, l'autre sur le corps d'électrode et on réunit le foyer du deuxième réflecteur avec la direction du regard du soudeur sur l'endroit de la soudure.

Dans des bi-systèmes partiellement réduits, une partie des sous-systèmes est remplacée par un seul sous-système. Par exemple, le catamaran a une seule voile pour deux coques ; le fusil à deux canons a une seule crosse pour deux canons ; le double tire-ligne a un seul emmanchement (fig. 24), etc. Dans les bi-systèmes totalement réduits, un des sous-systèmes (ou une substance) remplit la fonction de tout le système.

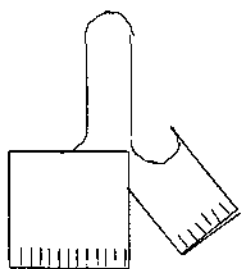


Fig. 24. Un tire-ligne selon le brevet № 1 266 755.

Ceci peut être illustré par l'exemple d'une simple lentille optique (mono-système) qui est analysée sur toute la ligne d'évolution des bi-systèmes :

Etape 2.1.1 – lunettes (la nouvelle propriété est la vision en relief absente dans le cas du monocle),

Etape 2.1.2 – lunettes bifocales (les lunettes pour la vision à distance et pour la vision rapprochée), les lentilles sont divisées en deux parties dotées de deux distances focales différentes, dans ce cas deux mono-systèmes sont réunis parallèlement.

Une combinaison successive de lentilles avec des caractéristiques légèrement différentes donne un ST absolument nouveau. Par exemple, un oculaire et un objectif forment un télescope ou un microscope élémentaire.

Etape 2.2.1 – des lentilles et des prismes (jumelles) ; ou bien des lentilles et un miroir (télescope à miroir).

Etape 2.2.2 – une lentille et un diaphragme (objectif d'un appareil de photo).

Transition 2.1.1 – 2.3 – une lentille avec une géométrie variable (une substance liquide optiquement active dans une enveloppe souple),

Transition 2.2.2 – 2.3 – des lunettes "caméléon" (photochromiques),

Etape 2.4 – l'objectif d'un appareil de photo : une lentille dotée de la géométrie variable couverte d'une couche noire électrochrome (mésomorphe) qui devient transparent lorsqu'on lui transmet un potentiel électrique ; un véritable cristallin artificiel.

Le brevet № 1 211 599 est un exemple d'un système optique fortement réduit. Pour déterminer l'angle de rotation d'un objet quelconque on propose de fixer sur ce dernier une plaque transparente dotée d'un enregistrement holographique de tous les angles possibles sous forme numérique. On dirige sur la plaque-hologramme un rayon de lumière émis par un laser qui, en se réfractant dans la plaque, affiche sur un écran l'angle de rotation directement sous forme d'information numérique sans passer par des dispositifs de mesurage, de lecture et de transformation, sans indicateurs électroniques, etc.

Examinons un autre exemple de la réduction de systèmes hétérogènes. Il est basé sur la combinaison d'une lampe (source de lumière) et d'un miroir (réflecteurs de lumière). Il correspond à la conception d'une lampe économique (Etats-Unis). Sur la surface interne d'une ampoule, s'applique une couche extrêmement fine d'argent insérée entre deux couches de dioxyde de titane qui laissent passer la lumière visible, mais qui réfléchissent les rayons infrarouges. Ce miroir transparent a une telle courbure que les rayons infrarouges se focalisent sur le filament et l'échauffent. Finalement, la lampe consomme deux fois moins d'énergie pour un même flux de lumière (*Science et vie*⁷⁶, 1978, №2).

⁷⁶ *Наука и жизнь*, 1978, № 2

Les bi-systèmes ne sont pas forcément formés de deux systèmes. Parfois il est plus simple de transformer en bi-système un mono-système en le divisant en deux parties identiques et en les combinant d'une manière précise. On aboutit à un résultat identique : on élimine des propriétés nuisibles, on obtient de nouvelles propriétés et on résout le problème.

Il a été réalisée une passoire dont les trous sont formés par des rainures de deux plaques disposées perpendiculairement (fig. 25). Le résultat est qu'il n'est pas nécessaire avec cette passoire de nettoyer chaque trou séparément car l'une des plaques s'enlève facilement (*Inventeur et innovateur*⁷⁷, 1989, № 1, p. 27).

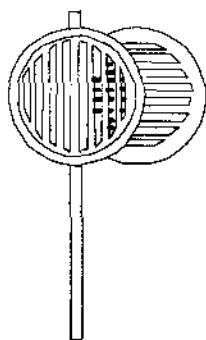


Fig. 25. "Bi-système" passoire.

La division de mono-systèmes se déroule souvent sous l'action de facteurs extérieurs. C'est également un cas de dynamisation (introduction d'une charnière).

Ainsi, l'idée d'un tracteur équipé d'un nouveau principe de changement de direction a été trouvée par F.A. Blinov quand il travaillait comme mécanicien sur le bateau à vapeur à roues "Hercule". Ce bateau transportait des marchandises d'Astrakhan à Nijni Novgorod pour la foire. En cours de route, l'arbre central, actionné par deux pistons de la machine à vapeur, s'est brisé. La situation était critique, le propriétaire des marchandises étant au bord de la faillite. Blinov a trouvé une solution ingénieuse en proposant de nettoyer l'endroit cassé et d'y introduire une charnière. Finalement, chacun des deux pistons est devenu autonome et a commencé à actionner sa propre roue propulseur. La vitesse est restée la même, alors que la manœuvrabilité s'est considérablement améliorée. Ce principe de changement de direction a été mis en œuvre pour un tracteur à chenilles (*La technique pour les jeunes*⁷⁸, 1989, № 2, p. 63).

De nouvelles propriétés apparaissent dans les bi-systèmes lorsque le système "remonte" dans l'enchaînement d'étapes 2.1.1 – 2.1.2 – 2.2.1 – 2.2.2, etc., autrement dit, vers l'accentuation de dissemblance entre les éléments.

Par exemple, le brevet № 1 190 110 présente la transition d'un ressort cylindrique (homogène) vers un ressort constitué d'éléments avec des caractéristiques légèrement différentes. Un ressort de compression-distension est formé de spires de deux dimensions différentes alternées, ce qui permet d'accroître son fléchissement. Pour équilibrer la capacité portante, les spires d'un diamètre inférieur sont coupées du côté interne par un plan longitudinal, ainsi, la surface de la coupe diminue jusqu'au diamètre de la spire.

Outre l'augmentation de la FUP, on obtient dans ce cas une nouvelle propriété : lorsque le ressort est entièrement comprimé, il occupe deux fois moins de place qu'un ressort cylindrique ayant le même nombre de spires. Pour que les spires d'un diamètre inférieur ne

⁷⁷ *Изобретатель и рационализатор*, 1989, № 1, с.27

⁷⁸ *Техника - молодежи*, 1989, № 2, с.63

soient pas plus rigides que celles d'un diamètre supérieur, à l'intérieur des premières on a enlevé le méplat (fig. 26).

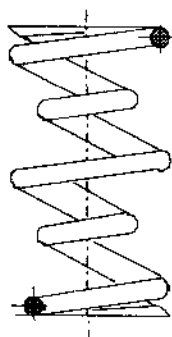


Fig. 26. Le ressort selon le brevet № 1 190 110.

Un innovateur estonien d'appareils optiques, Bernhard Schmidt, avait entamé en 1930 le travail de perfectionnement d'un télescope-réflecteur équipé d'un miroir parabolique. Progressivement, il était arrivé à l'idée que pour combattre l'aberration parabolique, il fallait renoncer au miroir parabolique et passer à un miroir sphérique (ce miroir est, par ailleurs, plus facile à fabriquer). Cependant les miroirs sphériques possèdent un défaut qui n'est pas moins grave, une aberration sphérique qui a conditionné à l'époque la transition vers les miroirs paraboliques. Il a réussi à résoudre cette contradiction en passant d'un mono-système vers un bi-système constitué d'éléments aux propriétés opposées : il a intégré dans le système optique du réflecteur une aberration d'une valeur égale à l'aberration sphérique du miroir principal, mais d'un signe opposé à celle-ci. Cela se réalise très facilement en introduisant dans le diaphragme une plaque correctrice qui porte à présent le nom de l'innovateur.

4.10.3. Formation et évolution des poly-systèmes

L'évolution des poly-systèmes suit un processus analogue. La seule différence consiste en ce que **lors de la formation des poly-systèmes, on voit apparaître un milieu intérieur** (ou tout au moins les conditions favorables à son apparition) avec des propriétés particulières. Il est naturellement possible d'utiliser ces propriétés pour obtenir du système technique des qualités supplémentaires.

Par exemple, le transport de vitres par paquets (un simple poly-système) jusqu'aux chantiers comporte une masse d'inconvénients : les vitres collent entre elles, le taux de casse est très élevé, la productivité est faible, etc. La solution consistant à huiler les vitres (on a utilisé un milieu intérieur) conduit à un taux de casse considérablement abaissé, les vitres sont devenues faciles à séparer, un avantage supplémentaire consiste à enlever l'huile après la peinture des fenêtres.

Exemples de *formation de poly-systèmes élémentaires* (étape 3.1.1) :

- ❑ Le brevet № 996 216 présente un procédé de découpage d'un matériau constitué de pierres (par exemple gravier), consistant à réunir le matériau en un bloc au moyen d'une substance liante, ensuite à le découper en plaques séparées, puis à le faire fondre et enfin à soustraire le liant.
- ❑ Le brevet № 1 006 151 présente un procédé d'usinage de bagues de piston réunies en lot au moyen d'un seul passage de l'outil.
- ❑ Le brevet № 1 313 659 présente un procédé d'usinage de pièces optiques (verre, céramique, cristaux) en collant des pièces fines en un bloc.

- Le brevet № 1 005 718 présente un procédé de récolte des céréales, selon lequel la moisson et le battage se déroulent à la maturité complète, et selon lequel pour réduire les pertes et l'égrènement, les plantes sont arrosées d'une colle liquide avant la moisson.

Transition vers les poly-systèmes avec des caractéristiques légèrement différentes :

Le brevet № 843 808 propose de semer chaque variété d'herbe ou de culture fourragère en bandes séparées sur toute la longueur du champ et de les faucher dans l'autre sens (selon la largeur du champ). Dans ce cas, l'herbe se mélangera directement dans l'ensileuse et les fermes d'élevage n'auront plus besoin de machines particulières destinées à mélanger le fourrage. Dans le brevet № 1 058 538, ce procédé est encore amélioré : on propose de semer différentes herbes en bandes larges de 0,7 à 2,2 m et de les faucher en diagonales. Dans ce cas l'ensileuse coupe au moins trois sortes d'herbe, par conséquent le mélange est encore plus homogène.

Les exemples des poly-systèmes réduits partiellement :

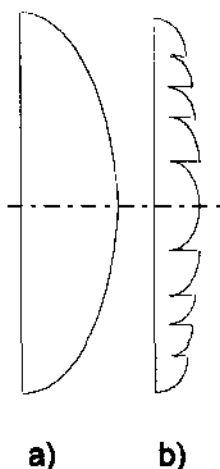
- l'élimination de poussières à l'aide d'un aspirateur est un moyen efficace pour nettoyer une habitation. Mais, comment lutter contre la poussière dans des ateliers lorsque les exigences de propreté sont extrêmement élevées ? Le taux de poussière doit être ramené quasiment à zéro, ce qui conduit à un nettoyage permanent. Cependant, il est peu efficace de laisser continuellement allumé des dizaines d'aspirateurs. On a réalisé un seul aspirateur pour tout l'atelier avec un réseau de tubes réparti sur toute la surface de l'atelier ;
- une idée identique a été mise en pratique en France dans des immeubles habitables. On a amené des tuyaux jusqu'aux appartements et on a intégré dans les murs des prises réceptrices qui permettent de brancher un tube avec des accessoires (*Jeune technicien*⁷⁹, 1989, № 7, p. 35) ;
- depuis longtemps, le réglage des montres se fait en se référant à des signaux transmis par radio, ensuite une montre et un récepteur radio ont été combinés dans le même boîtier, mais c'était toujours à l'homme de remonter la montre. Il existe une montre dans laquelle un seul microcircuit remplit le rôle d'une montre et d'un récepteur radio. Le système sera complètement réduit lorsque toutes les montres se mettront à l'heure automatiquement par le biais de signaux émis par une montre atomique étalon ;
- une chaufferie (une seule chaudière au lieu de milliers de chaudières individuelles), un central téléphonique, des centres de télévision, etc.

Pour évacuer la chaleur de l'appareillage électronique dans le boîtier de l'appareil, on pratiquait des ouvertures équipées de plaques obturatrices (c'est un poly-système classique). Lorsque l'appareil s'échauffait, on enlevait les plaques et pour que la poussière ne s'accumule pas dans un appareil débranché, on fermait les ouvertures. Dans le brevet № 1 066 053, il est proposé un poly-système complètement réduit : une seule grande ouverture ondulée pratiquée sur un boîtier en matériau à effet de mémoire. Les dents ondulées s'écartent d'elles-mêmes lors de l'échauffement et se referment lors du refroidissement.

Revenons sur l'évolution de l'optique présentée dans les paragraphes précédents pour illustrer l'évolution des poly-systèmes :

⁷⁹ *Юный техник*, 1989, №7, с.35

Un domaine de l'optique utilisant des éléments dits plans a permis des évolutions intéressantes. Par exemple, à l'Institut de l'automatique et de l'électrométrie de l'Académie des Sciences de Russie, il a été élaboré des lentilles planes – kinoformes. Un élément optique comme celui-ci remplace un objectif encombrant constitué de plusieurs verres (*Industrie socialiste*⁸⁰, 31.10.85). Sur la surface d'une plaque plane en verre, on applique des lignes en relief d'une hauteur égale à quelques longueurs d'une onde de lumière.



a – lentille traditionnelle ; b – élément plan.

Fig. 27. Éléments de focalisation.

Les propriétés de deux éléments (fig. 27 a, b) seront identiques si le changement de l'épaisseur du deuxième élément d'une "marche" à une autre sera égal au nombre entier des longueurs d'ondes du rayonnement focalisé. Outre une forte réduction en dimension des systèmes optiques, les éléments plans ont été élaborés ; ils permettent d'obtenir de nouvelles propriétés. Ainsi, à l'Institut de la Physique générale de l'Académie des Sciences de Russie sous la direction de A.M. Prokhorov, de nouveaux éléments plans permettant de transformer le rayonnement avec un front d'onde spontané en un rayonnement avec un front d'onde contrôlé ou bien de concentrer l'énergie de rayonnement sur une courbe définie avec une répartition de l'intensité définie (*Electronique quantique*⁸¹, 1984, volume 11, №1, p. 155). En d'autres termes, quel que soit l'angle sous lequel la lumière tombe sur un élément plan, elle sera toujours focalisée sur un point ou sur une ligne précis, sachant que la ligne peut avoir n'importe quelle configuration (cercle, ellipse, sinusöide, etc.) et que l'intensité de la concentration d'énergie sur la longueur de cette ligne peut être également contrôlée.

Il persiste quelques questions relatives aux poly-systèmes :

Comment utiliser la transition vers le poly-système ? Il est nécessaire de multiplier un objet technique "par lui-même". Quel changement s'est-il produit ? Est-il apparu un milieu intérieur ? Comment peut-on utiliser ses propriétés ? Décrivez les nouvelles propriétés des poly-systèmes à commencer par un poly-système homogène et jusqu'à un poly-système inverse. Comment doit être un poly-système partiellement réduit ? Est-il possible de réduire ce système entièrement ?

Si l'on prend l'exemple des téléviseurs et du système de réception, on peut considérer que l'antenne collective n'est que le premier pas vers sa réduction. Il serait plus pratique

⁸⁰ *Социалистическая индустрия*, 31.10.85

⁸¹ *Квантовая электроника*, 1984, т.11, №1, с.155

d'avoir un seul bloc télé pour tout un immeuble, quartier, ou même pour toute une ville (un seul bloc d'alimentation, un seul canal radio, un seul bloc de traitement d'image, etc.) et de laisser dans les appartements uniquement l'écran et un organe de contrôle (une télécommande). Il est possible d'aller encore plus loin : transmettre des images à partir d'une seule station émettrice par un câble en fibre optique et laisser dans les foyers juste l'écran avec une télécommande (il existe déjà un réseau d'abonnés à la radio, pourquoi ne pas créer un réseau identique pour les abonnés de la télévision ?). La télévision est en train de s'organiser avec d'autres systèmes : la télévision plus un magnétoscope, plus une caméra vidéo (un centre de télé chez soi), la télévision en tant qu'écran d'un ordinateur, plus un poste de radio, plus une montre, plus un journal (télétexte), plus une bibliothèque (connexion de la télévision sur un réseau télévisé informatique), plus un téléphone (vidéo téléphone), plus un service de renseignement, etc. L'évolution présentée ici conduit à considérer que la télévision "engloutira" tous les systèmes informatiques. D'un autre côté, une centralisation plus importante implique une augmentation du degré d'influence de l'abonné sur la télévision. Par exemple, le contrôle de la télévision ne devrait plus se faire uniquement par le biais de nos lettres. Dans certains pays, on connecte sur la télévision une console avec un clavier. Toutes les consoles sont reliées à un ordinateur central. Avant le début d'un concert, la liste des artistes s'affiche à l'écran et le spectateur choisit les numéros des artistes qu'il souhaiterait voir. L'ordinateur compose le programme du concert à l'aide des numéros qui ont eu le plus de voix. L'étape suivante est la composition d'un programme individuel, par exemple à l'aide d'un magnétoscope. Dans ce cas, il faudra posséder chez soi une vidéothèque, changer les cassettes, sélectionner les extraits nécessaires, etc. Il serait plus simple de centraliser la vidéothèque : un spectateur particulier peut alors commander un enregistrement par le biais d'une console ; parallèlement, il est possible de lui envoyer, sur une partie de l'écran, une information sur les programmes télévisés et les actualités en cours.

4.11. AUGMENTATION DU DEGRE D'IDEALITE⁸²

4.11.1. Formulation et principales notions

L'évolution de tout ST tend vers le degré le plus haut de l'idéalité.

Le ST idéal est un système dont la masse, les dimensions et la capacité énergétique tendent vers zéro, alors que son aptitude à remplir les fonctions ne diminue pas.

Dans le cas extrême, le ST idéal est un système qui n'existe pas mais qui conserve et remplit ses fonctions.

Etant donné qu'un objet matériel est indispensable pour remplir une fonction, la fonction d'un système disparu (idéalisé) doit être effectuée par d'autres systèmes (des ST voisins, super-systèmes ou sous-systèmes). Cela signifie que certains systèmes se transforment de façon à remplir des fonctions supplémentaires, notamment les fonctions des systèmes disparus. La fonction "étrangère" peut être identique à celle du ST qui la réalise, dans ce cas on voit tout simplement accroître la fonction utile principale (FUP) du système concerné. Si les fonctions ne coïncident pas, on voit augmenter le nombre de fonctions du système.

⁸² Revue par Olivier Piccin et par Nathalie Gartiser, 2001-2002

La disparition des systèmes et l'augmentation de la FUP sont deux aspects du processus général d'idéalisation.

De ce fait, on distingue deux types d'idéalisation des systèmes (fig. 28) :

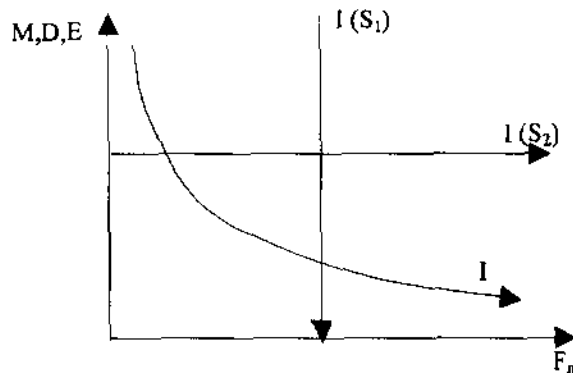


Fig. 28. Types d'idéalisation des systèmes

- dans le 1^{er} type, la masse (M), les dimensions (D) et la capacité énergétique (E) tendent vers zéro, alors que la FUP (ou le nombre de fonctions que remplit le ST) reste constant :

$$I(S_1) = \lim_{\substack{M, D, E \rightarrow 0 \\ n = \text{const}}} F_n(M, D, E)$$

(Où F_n est la fonction du système ou la "somme" de quelques fonctions.)

- dans le 2^e type, la FUP (ou le nombre de fonctions remplies par le ST) augmente, alors que la masse, les dimensions et la capacité énergétique restent invariables :

$$I(S_2) = \lim_{\substack{M, D, E = \text{const} \\ n \rightarrow \infty}} F_n(M, D, E)$$

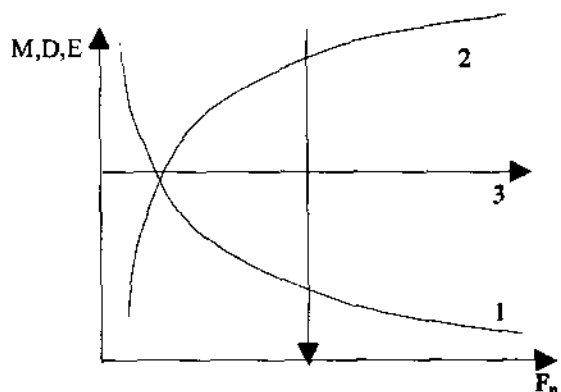
Le type général d'idéalisation représente les deux processus (la réduction de M, D, E et l'augmentation de la FUP ou du nombre de fonctions) :

$$I = \lim_{\substack{M, D, E \rightarrow 0 \\ n \rightarrow \infty}} F_n(M, D, E)$$

Cela signifie que le cas extrême d'idéalisation de la technique se définit comme la diminution (et, en fin de compte, la disparition) de la technique avec l'augmentation simultanée du nombre de ses fonctions.

Dans l'idéal, la technique ne doit pas exister, mais doit remplir les fonctions dont l'homme et la société ont besoin.

L'idéalisation des ST réels diffère de celle présentée par les relations ci-dessus. Le plus souvent on observe une idéalisation mixte : le gain en M, D, E obtenu par l'idéalisation est aussitôt dépensé pour augmenter la FUP ou le nombre de fonctions. Ces processus peuvent être illustrés schématiquement par des courbes (fig. 29).

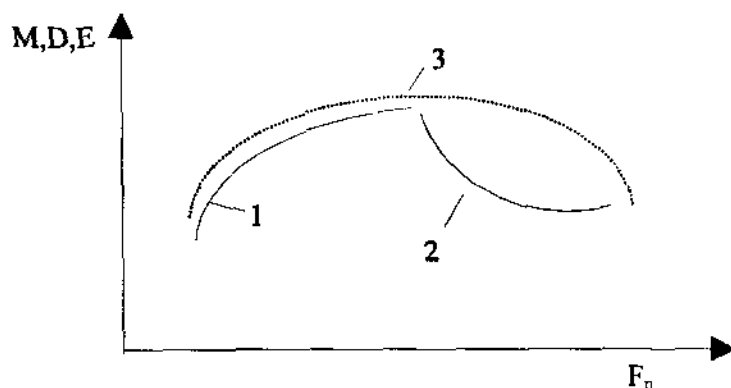


1 – idéalisation générale, 2 – augmentation des sous-systèmes avec des fonctions utiles (dissociation des ST – augmentation de M, D, E), 3 – la résultante d'évolution I (S)

Fig. 29. Un des types mixtes d'idéalisation des systèmes réels

Ces rapports caractérisent, par exemple, l'aviation, le transport par voie d'eau, la technique militaire, etc. Le processus d'idéalisation est identique apparemment au 2^e type (de la fig. 28) – I (S₂), où la FUP augmente et M, D, E restent constants. En réalité, M, D, E des sous-systèmes diminuent, alors que ces sous-systèmes doublent, triplent ou bien de nouveaux sous-systèmes apparaissent, etc. Ainsi, au niveau des sous-systèmes, on observe l'idéalisation du 1^{er} type et au niveau de tout le ST – l'idéalisation du 2^e type.

Si l'on sépare les processus 1 et 2 dans le temps (fig. 29), c'est à dire si l'on divise le processus mixte en deux processus distincts, on obtiendra un processus général (normal) d'évolution des ST comprenant une phase de dissociation et une phase d'association du système (fig. 30).



1 – croissance des ST, 2 – décroissement des ST, 3 – ligne d'embrassement

Fig. 30. Idéalisation normale des systèmes réels

Après son apparition, le ST commence à "envahir" l'espace (il augmente ses M, D, E) et, après avoir atteint une certaine limite, il diminue.

Le processus d'évolution des ST se déroule dans le temps, c'est pourquoi l'axe horizontal (F_n – FUP) est également l'axe du temps : chaque innovation accroît la fonction utile principale du système (fig. 31).

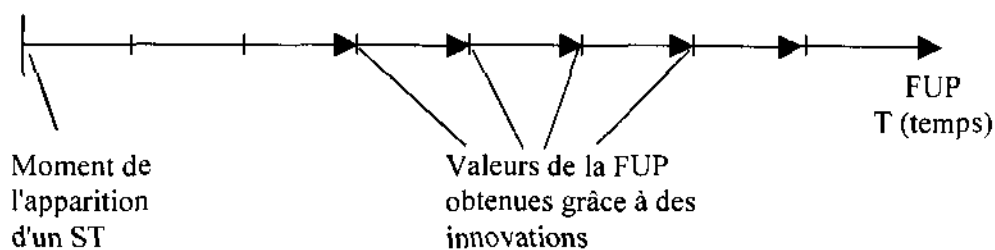


Fig. 31. Evolution des ST dans le temps

Ces graphiques peuvent être transformés en un type d'idéalisation définitif, notamment en une courbe ondulatoire d'évolution des ST dans l'espace et dans le temps (fig. 32). Ce modèle d'évolution est vrai pour tout niveau de hiérarchie : super-systèmes, sous-systèmes et substance.

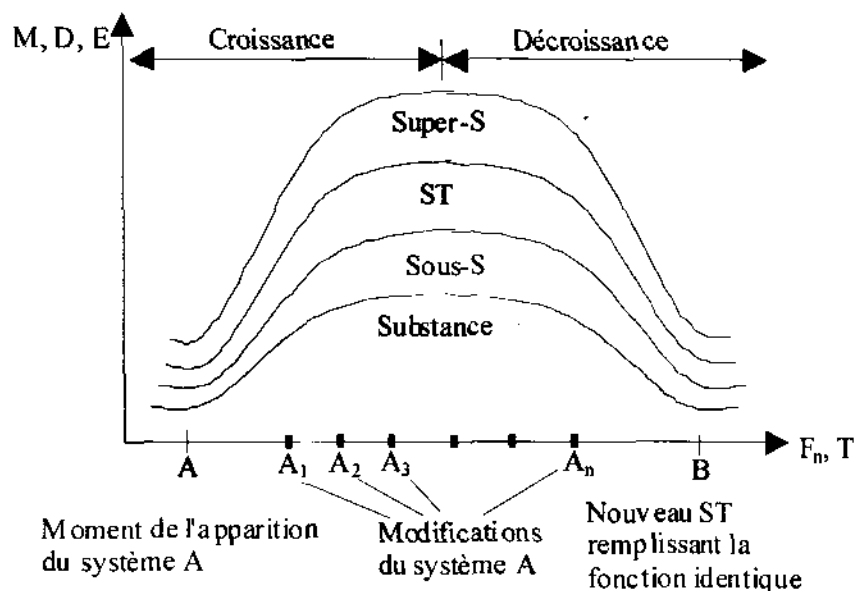


Fig. 32. Modèle d'évolution des ST dans l'espace et dans le temps

Donc, l'évolution (c'est-à-dire l'idéalisation) des systèmes techniques peut être décrite comme suit :

$$I = \lim_{n \rightarrow \infty} F_n(M, D, E) + \lim_{n \rightarrow \infty} F_n(M, D, E)$$

$(M, D, E) \rightarrow \max(M, D, E)$ $(M, D, E) \rightarrow 0$

← croissance ► décroissance ►

Un des mécanismes de croissance (c'est-à-dire de transition vers les super-systèmes), notamment la transition mono-bi-poly, correspond bien à "l'onde" d'évolution des ST (fig. 33). A tout moment d'évolution, le système peut être réduit à une substance idéale – à un nouveau mono-système qui peut donner la naissance à une nouvelle étape d'évolution.

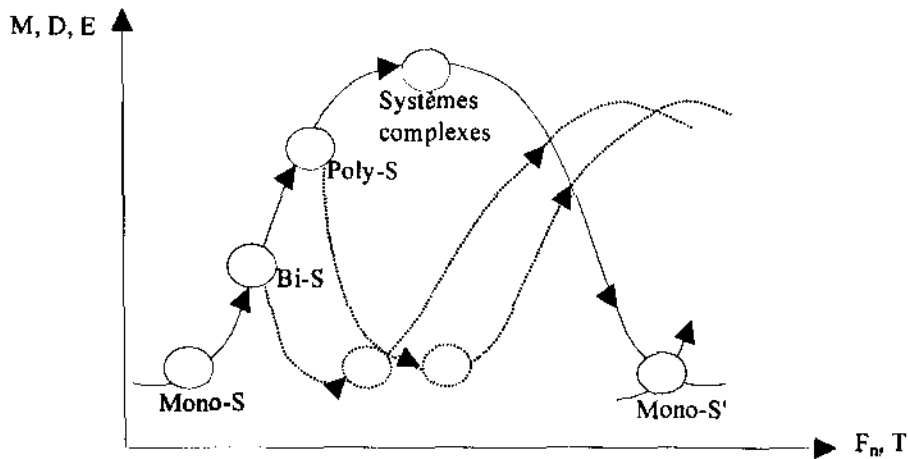


Fig. 33. Modèle d'évolution des systèmes techniques

L'analyse de l'histoire de l'évolution de nombreux ST montre qu'ils évoluent tous à travers une suite d'événements :

4. Apparition du besoin.
5. Formulation de la fonction utile principale, c'est-à-dire de la commande sociale d'un nouveau ST.
6. Synthèse d'un nouveau ST, début de son fonctionnement (FUP minimale).
7. Augmentation de la FUP – tentative de "tirer" du système plus qu'il ne peut donner.
8. Lorsque la FUP augmente, une des parties (ou certaines propriétés) du ST se dégrade, ce qui engendre une contradiction technique, d'où apparaît la possibilité de formuler un problème d'innovation !
9. Formulation des modifications requises du ST (la réponse aux questions : qu'est ce qu'il faut faire pour augmenter la FUP et qu'est ce qu'il nous empêche de le faire ?), c'est-à-dire la transition vers un problème d'innovation.
10. Résolution du problème à l'aide de connaissances dans le domaine scientifique et technique (et même plus large – dans le domaine culturel en général).
11. Modification du ST suivant l'innovation.
12. Augmentation de la FUP (cf. étape 4).

Etc.

Analysons plus en détail certaines étapes d'évolution des ST.

4.11.2. Naissance d'un besoin et augmentation de la FUP qui en découle

Tout ce qui se fait dans le monde de la technique se fait pour satisfaire les besoins de l'homme et de la société. Si l'on n'éprouve pas le besoin d'un ST il n'apparaîtra jamais, en revanche si le besoin existe, avec le temps il devient de plus en plus fort et rien n'empêchera l'homme de le réaliser. La nécessité constitue la source des innovations.

De nos jours, le poids de la force musculaire dans l'industrie est minime – environ 0,1 % du total de l'énergie mécanique utilisée dans la production. Ce qui signifie que sans

machines il est possible d'obtenir uniquement 1/1 000 du volume total de produits réalisés d'aujourd'hui.

Le besoin d'économiser les forces est un des besoins vitaux de l'homme outre les besoins de nourriture, d'eau, de sommeil, de reproduction, de protection contre les dangers extérieurs. C'est ce besoin qui est à l'origine de l'innovation et du perfectionnement de la technique⁸³. Le besoin joue le rôle de nécessité, c'est là que commence la contradiction d'un individu ou de la société avec l'environnement et que l'équilibre nécessaire entre les deux se voit troublé. La contradiction apparue devient une force motrice de l'activité débordante visant à satisfaire le besoin ce qui fait évoluer ultérieurement la technique. Le progrès technique serait impossible sans le rôle stimulant du besoin. La loi du besoin croissant fonctionnait jusqu'à nos jours (et il n'y a rien qui pourrait nous faire croire que cela changera dans l'avenir) dans l'histoire de l'humanité objectivement et indépendamment de la conscience et de la volonté humaine. La nécessité de satisfaire les besoins en constante croissance de la société entre en contradiction avec les moyens existants. Cette contradiction se résout par la force des capacités créatives de l'esprit humain.

Le progrès technique est avant tout une transmission de fonctions de l'homme à la technique. C'est pourquoi, au cours de toute l'histoire, on peut observer le processus de transformation des instruments en systèmes techniques. Tôt ou tard, on entreprend des tentatives de perfectionnement des instruments de manière à augmenter leur FUP ou leur nombre de fonctions ou encore à remplir une partie des fonctions sans participation de l'homme.

Par exemple, pour éviter la surchauffe du côté tranchant de l'outil d'un tour, on va y intégrer un cylindre en matériau poreux imprégné d'un liquide refroidissant (brevet № 1 201 063). Dans le brevet № 1 175 611, on a incorporé à l'outil un caloduc (tube de transmission de chaleur), alors que dans le brevet № 1 175 612, on propose d'ajouter au caloduc un joint à froid de matériaux semi-conducteurs.

En Angleterre, on produit des tournevis dotés de ventouses (assurant la saisie et le maintien d'une vis), d'un petit moteur électrique intégré (50 à 1 200 tr/min), de lames interchangeable (pour des vis d'un diamètre variant de 0,4 à 7 mm) et d'un dispositif de commande électronique.

Le brevet № 1 214 495 décrit un stylo électronique. Un capteur de force et un bloc électronique intégrés contrôlent la dose d'encre amenée dans le canal capillaire de l'embout.

L'accroissement des besoins devance le plus souvent la progression de la FUP dans un système technique croissant et l'impossibilité de satisfaire les besoins par des moyens (ST) existants pousse à inventer de nouveaux systèmes ou à perfectionner les vieux ST en introduisant de nouveaux sous-systèmes.

Le premier feu tricolore a été utilisé à Londres en 1868, quand l'intensité de la circulation des voitures tirées par des chevaux a dépassé toutes les limites de sécurité. On a vu apparaître une nécessité absolue d'inventer un nouveau ST de régulation de la circulation. Sur une place très animée, devant le parlement anglais, fut installé un poteau muni de lanternes à gaz contrôlées manuellement, qui, grâce à des verres colorés, émettaient deux signaux rouge et vert. Cependant, l'introduction de ce nouveau ST a engendré l'effet néfaste suivant : les lanternes en étincelant et crépitant effrayaient les chevaux. C'est seulement au début du XX^e siècle aux Etats-Unis que l'on a vu apparaître des feux tricolores de signalisation dotés d'ampoules électriques. Ils étaient horizontaux et possédaient trois filtres de couleur rouge,

⁸³ СИМОНОВ П.В. *Эмоциональный мозг*. М.: Наука, 1981.

jaune et vert. La conception s'est avérée réussie et peu de temps après le standard international du feu tricolore vertical fut adopté.

La première catastrophe aérienne a eu lieu en 1908 à cause d'une hélice tombée en panne. C'était une époque où la défaillance d'un quelconque organe était susceptible de provoquer un incident aérien (situation dangereuse ou catastrophique). Pour accroître la sécurité des vols, il fallait de nouvelles idées concernant le renforcement de la stabilité et de la contrôlabilité des avions lors des vols dans une atmosphère perturbée. En 1914, lors d'un salon aérien fut présenté un nouvel avion pourvu d'un stabilisateur de vitesse de vol. Cet avion a brillamment passé tous les essais en effectuant un aller-retour Versailles – Chartres (la vitesse du vent étant de 15 m/s.) à la vitesse de 75 km/h. De cette manière, le besoin d'accroissement de la FUP a été satisfait par la conception d'un nouveau sous-système correspondant au stabilisateur.

Plus l'évolution de la FUP est importante, plus la difficulté que l'on doit surmonter est grande. La conception initiale de ST dotés de FUP très avancées est le plus souvent maladroite, et leur fonctionnement se situe à la limite d'un éventuel échec. Cet état de fait était parfois accepté notamment en temps de guerre où le gain des courses à l'innovation technique pouvait être synonyme de victoire.

En 1943, au-dessus de Moscou, à une altitude, prodigieuse pour l'époque, de 13 000 mètres, on voyait souvent apparaître un avion de reconnaissance allemand. Pendant un long moment il échappait impunément aux canons antiaériens russes qui n'arrivaient pas à l'atteindre et aucun avion russe n'était capable de monter à une telle altitude. De toute urgence, des ingénieurs ont conçu un avion spécial d'interception doté d'un compresseur d'air supplémentaire, allégé au maximum en vue d'atteindre l'altitude de 14 000 mètres. Dans cet avion, le dossier blindé du pilote a été remplacé par un dossier en contre-plaqué et n'a été conservée, pour tout armement, qu'une seule mitrailleuse. Les deux appareils se sont rencontrés enfin à l'altitude de 13 000 mètres pour se livrer bataille. Mais les avions n'ont pas pu se mesurer car ils fonctionnaient à la limite de leurs possibilités. Il s'est avéré d'ailleurs que l'avion allemand n'était pas du tout armé. De son côté, l'avion russe n'a pas réussi à prendre une position d'attaque. Les deux avions ont à peine pu faire un demi-tour malgré une capacité de virage beaucoup plus importante. Après avoir tracé quelques cercles dans les airs, ils se sont séparés pour ne plus jamais se rencontrer (G.A. Méérovitch. *Effet des grands systèmes*⁸⁴. M. : Znanié, 1985, p. 61).

Les modifications ultérieures des ST qui ont une FUP accrue et qui sont dotés de nouveaux sous-systèmes utiles ont engendré de nouvelles exigences envers ces ST, de nouveaux besoins aboutissant à un nouvel accroissement de la FUP.

Le premier réfrigérateur a été inventé par un marchand de beurre T. Moor, (brevet américain, 1803). Il livrait sa marchandise dans tout Washington et le besoin fonctionnel lié à cette invention était vital pour lui. C'était une boîte de taille importante, pourvue de doubles parois entre lesquelles était placée de la glace. La fonction utile était atteinte. Cependant, l'approvisionnement en glace s'effectuait en hiver et il fallait la stocker, la déplacer, la casser, etc. En 1868, a été inventé un compresseur de refroidissement destiné à fabriquer de la glace artificielle pour le stockage de produits alimentaires, pour les fabriques de chocolat, etc. A la fin du XIX^e siècle, on a vu apparaître les premières machines à glace utilisées par des particuliers. Une de ces machines nommée "Esquimau" se vendait en Russie. Ces machines consommaient beaucoup de combustible : bois, charbon, kérosène. En 1911, la société

⁸⁴ Г.А. Месерович. *Эффект больших систем*. М.: Знание, 1985, с.61

"General electric" a mis au point la production de réfrigérateurs tels qu'ils se présentent aujourd'hui : la machine refroidissante tenait dans un placard de cuisine.

Ce réfrigérateur a été inventé par un professeur d'un collège d'un couvent français T. Odifren. Le compresseur, muni de courroies de transmission, était très bruyant, le gaz (ammoniac et anhydride sulfurique) fuyait et la cuisine était envahie par une odeur désagréable. En 1926, un ingénieur danois, A. Stindroup, a franchi l'étape suivante : il a disposé le compresseur et ses courroies sous une cloche hermétique isolante. Le réfrigérateur est devenu silencieux et inodore. Le premier réfrigérateur sans compresseur (à absorption) a été inventé en Suisse par B. Platen et K. Munters en 1922. Depuis cette époque, ces deux technologies de réfrigération rivalisent. En 1951, l'Institut de semi-conducteurs de l'Académie des Sciences de Russie a créé le premier réfrigérateur thermoélectrique. Toutefois, les réfrigérateurs à compresseur se sont perfectionnés très vite et l'on a vu apparaître des systèmes automatiques multifonctions qui préparent automatiquement de la glace à partir de l'eau, refroidissent des boissons jusqu'à une température donnée, dégèlent le beurre jusqu'à un certain degré de dureté, possèdent un bloc intégré qui prévoit l'apparition de défaillances, etc.

L'horloge, en tant que ST qui ne dispose que d'une unique fonction utile : indiquer l'heure, possède une longue histoire d'évolution. A la base des principes de fonctionnement de ce système, se trouvaient toujours un processus périodique clairement identifié : rotation de la Terre (horloge solaire), oscillation d'un balancier (horloges mécaniques et électromécaniques), diapasons (horloge à diapason), cristaux de quartz (horloge à quartz). La valeur de la FUP d'une montre électronique moderne est très élevée— l'erreur d'indication de l'heure n'excède pas 10 secondes par an. Ce niveau d'exactitude a dépassé le besoin et, de ce fait, l'évolution a vu augmenter le nombre de fonctions remplies. A ce jour, le nombre de ces fonctions augmente continuellement : capteurs de tension, de pouls, de température, de résistance de la peau, alarmes sonores et lumineuses, fonctions bloc-notes, agenda, magnétophone, radio, téléviseur, jeux, ordinateur, possibilité d'émettre un signal codé d'urgence. Il existe des montres sans source d'alimentation, auto-rechargeables qui puisent l'énergie dans l'environnement.

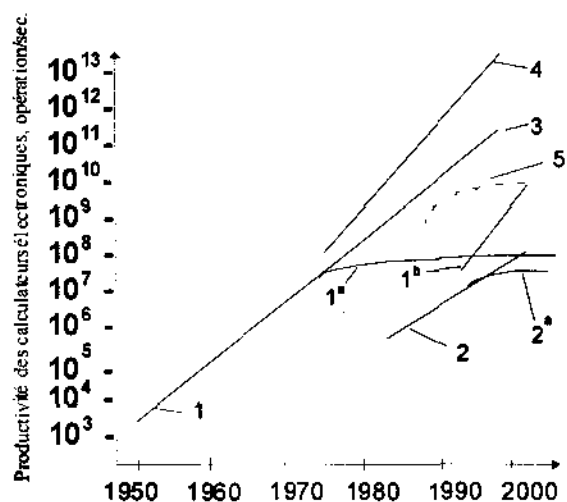
L'invention de systèmes ayant une FUP qui dépasse le niveau des besoins exprimés initialement n'est pas rare dans l'histoire de la technique (cas des innovations en avance sur leur temps). Dans notre société hautement industrialisée, les innovations devancent encore plus souvent les besoins réels des consommateurs. Il devient alors nécessaire de rechercher de nouveaux domaines d'application (ce qui constitue l'objectif du marketing) ou de susciter les besoins nouveaux par une publicité à outrance et "l'éducation" du consommateur. Il est indispensable de distinguer les véritables besoins de la société des besoins inutiles, parfois stupides. Selon des sociologues américains, environ 80 % des produits fabriqués aux Etats-Unis depuis le début du siècle ne satisfont pas les besoins réels, voire sont inutiles à la société.

La FUP d'un système s'accroît en permanente. Le ralentissement de sa croissance, des anicroches ou de brèves interruptions se produisent uniquement lorsque le ST a quasiment épuisé les ressources du principe physique à la base du système en question. Le changement du principe de fonctionnement donne ainsi une nouvelle ressource d'évolution.

A.A. Mikoulin, constructeur renommé de moteurs d'avions, raconte : "Analysons le tableau des records depuis 1904. Chacun constatera une croissance ininterrompue approximativement jusqu'en 1943. Ensuite, chaque dizaine de kilomètres supplémentaire par heure exigeait beaucoup d'efforts. Après avoir atteint une valeur de 700 à 950 km/h, la courbe de la vitesse s'est arrêtée brutalement en raison de la "barrière sonique". Un accroissement supplémentaire de vitesse nécessitait d'augmenter la propulsion et la puissance en progression géométrique. Mais augmenter la propulsion conduit à accroître les dimensions du moteur et,

par conséquent, les dimensions de tout l'avion. C'est à ce moment là que l'on s'est souvenu des moteurs à réaction" (A. Agranovski. *Carnet de notes. "Amitié des peuples"*⁸⁵, 1987, №4, p. 188-189).

La croissance de la vitesse de calcul des calculateurs électroniques a suivi jusqu'à présent une loi quasi linéaire (fig. 34). Toutefois, lorsque la vitesse de 1 012 opérations par seconde sera atteinte, la croissance de la FUP ralentira et il y aura une transition vers un nouveau principe de fonctionnement, notamment des formes moléculaires de support.



1 – calculateurs de productivité maximale, 1a – monoprocresseurs scalaires, 1b – multiprocresseurs scalaires, 2 – calculateurs électroniques personnels, 2a – monoprocresseurs scalaires, 3 – super calculateurs électroniques, 4 – calculateurs spéciaux multiprocresseurs, 5 – calculateurs électroniques cryogéniques monoprocresseurs scalaires.

Fig. 34. Croissance de la vitesse de calcul des calculateurs électroniques de différents types.

Le tableau ci-dessous présente l'évolution des films photographiques couleurs produits en série de 1976 à 1986 (*Science et vie*⁸⁶, 1987, №6, p. 113) :

Année du début de la production	Photosensibilité, unité GOST-ISO (norme d'Etat)	
	Négatif	Diapositive
1976	400	-
1978	-	400
1982	1 000	-
1983	-	1 000
1984	1 600	1 600
1986	3 200	3 200

Par ailleurs, il est encore possible de doubler la photosensibilité en développant la plupart des types de pellicules au moyen de procédés spécifiques. Il est probable que la croissance ultérieure rencontrera des contradictions insolubles dans le cadre d'un procédé donné.

La résolution d'un problème d'innovation (résolution d'une contradiction technique) fait avancer le ST, alors que le compromis le laisse sur place. Grâce à l'innovateur, le système

⁸⁵ А. Аграновский. Из записных книжек. "Дружба народов", 1987, № 4, с.188-189

⁸⁶ Наука и жизнь, 1987, № 6, с.113

"échappe" à l'action des facteurs nuisibles (les exigences de l'environnement) qui empêchent la FUP de croître. Le système voit apparaître de nouvelles propriétés et de nouvelles fonctions ; il voit également changer (par réorganisation ou substitution) ses substances et ses sous-systèmes.

4.11.3. Croissance de la substance dans le ST

Le processus de croissance d'un ST (la première moitié de la vague d'évolution, cf. fig. 32) commence le plus souvent par une évolution de la substance. C'est au niveau de la substance que l'action des facteurs limitant l'augmentation de la FUP se manifeste le plus fortement.

Un grand nombre d'innovations et d'améliorations consistant à concevoir de nouveaux sous-systèmes, destinés à remplir des fonctions utiles supplémentaires ou à augmenter la fonction existante, ont vu le jour en l'absence des propriétés nécessaires dans les substances (matériaux) du système technique ou bien en raison de l'incapacité à utiliser des ressources latentes de substance, c'est-à-dire ses propriétés.

Dans l'évolution de la substance des systèmes techniques, il est possible de distinguer quelques stades ou périodes transitoires :

- a) tentatives d'améliorer ou d'isoler la propriété nécessaire de la substance,
- b) division d'une substance homogène en zones fonctionnelles,
- c) spécialisation des zones selon les fonctions, transition vers une substance hétérogène,
- d) transformation de substances composées en sous-systèmes,
- e) réduction d'une substance composée ou d'un sous-système en une substance idéale.

Pour augmenter la FUP, il faut augmenter une propriété quelconque de la substance. La solution la plus simple consiste à augmenter les paramètres de cette substance (masse, dimensions, dépenses d'énergie). Cette tentative se heurte souvent à la contradiction suivante : d'autres propriétés ou parties d'un ST se dégradent. De ce fait, nous sommes confrontés à une contradiction suivante : il faut améliorer la propriété de la substance, mais il est impossible de le faire. On essaie, donc, d'améliorer la substance : on cherche la propriété nécessaire et on "neutralise" les propriétés nuisibles secondaires. Ainsi, on voit apparaître une multitude de variantes de la même substance destinée à des systèmes, objets et conditions de travail différents. Par exemple, rien qu'en Russie, on produit près de trois mille variétés d'acier (*Progrès scientifique et technique : problèmes et solutions*⁸⁷, 1985, №6, p. 3). Une telle spécialisation excessive de la substance (une nouvelle sorte d'acier quasiment pour chaque nouveau système technique) constitue une contrainte. Puisqu'il est impossible de concevoir un matériau couvrant toute la gamme de propriétés requises, on est amené à obtenir des gains microscopiques dans la FUP en isolant telle ou telle propriété de la substance.

Le brevet № 1 066 047 peut illustrer l'obtention d'une FUP très élevée : un cylindre faisant partie d'un laminoir à plusieurs cylindres a été réalisé en monocristal de leucosaphir. Afin de prolonger sa durée de vie et accroître la qualité de laminage, l'axe cristallographique du cristal (0,0001) est orienté le long de l'axe de rotation du cylindre. Il est proposé d'utiliser une pierre précieuse de première qualité, une forme de corindon, dotée d'une orientation de

⁸⁷ НТР: проблемы и решения, 1985, № 6, с. 3

réseau cristallin plus avantageuse. Est-ce que cela signifie que la limite de la croissance de la FUP est atteinte ? Bien évidemment, non. Au delà de cette solution, il pourrait exister des cylindres de diamant, mais nous n'atteindrions toujours pas les limites de la croissance. Si l'on ne conçoit pas de substance plus dure que le diamant, il faudra trouver un autre moyen pour augmenter la FUP (un nouveau procédé métallurgique, par exemple).

Le processus d'évolution aboutit généralement à la division d'une mono-substance en zones, en couches, en parties, et à la transition vers une substance composée. La raison en est simple : lors d'une énième tentative d'augmenter la FUP, il s'avère que la propriété dont dépend cette augmentation doit appartenir non pas à toute la substance, mais uniquement à une de ses parties (zone de travail). Il est, en effet, plus facile de renforcer la propriété dans une zone que dans toute la substance.

Voici quelques exemples de division d'une mono-substance en zones fonctionnelles.

L'invention de la poudre sans fumée et l'introduction des canons rayés au milieu du XIX^e siècle ont bouleversé la technique de l'artillerie : ceci a constitué une opportunité réelle d'accroître considérablement la portée des canons. Cependant, l'augmentation de la puissance de la charge unitaire a mené les constructeurs dans une impasse. Même la substitution de la fonte et du cuivre par l'acier n'ont pas donné les résultats souhaités : les tubes en acier ne supportaient qu'une pression maximale de 200 MPa. De plus, l'épaisseur des parois influait faiblement sur la résistance des canons. C'est alors que les recherches du Français G. Laméont éclairé la situation : il a démontré que dans un tube qui subit de l'intérieur une pression uniforme, les couches de métal sont soumises à des sollicitations irrégulières : les couches intérieures supportent la charge principale, tandis que les couches extérieures sont à peine sollicitées. Par conséquent, fabriquer des canons à parois très épaisses n'a aucun sens si l'on ne fait pas travailler les couches extérieures. Ce problème a été ingénieusement résolu en 1861 par l'ingénieur russe A.V. Gadolin. Ce dernier a proposé de renforcer le canon par des anneaux que l'on assemblait à chaud sur le corps du canon et qui, après refroidissement, comprimaient les couches intérieures.

Il y a peu de temps, on a analysé une épée russe ancienne (X^e siècle) découverte en 1900. Il est apparu que le métal la constituant possédait une structure hétérogène : les côtés tranchants étaient d'une dureté élevée, alors que la partie centrale de la lame était en fer de faible dureté. La microstructure de ces zones était également différente, constituée de deux métaux assemblés par forgeage (*La connaissance est notre force*⁸⁸, 1986, №4, p. 7).

Les célèbres ciseaux qui s'affûtent d'eux-mêmes (fig. 35), inventés par Ignatiev en 1926, sont également constitués de plusieurs couches. Biologiste de formation, il s'est posé la question "pourquoi les dents et les griffes des animaux sont-elles tout le temps aiguisées ?". Pourtant, en s'usant elles devraient s'émousser. Cependant, non seulement elles restent pointues, mais elles conservent l'angle de la pointe. Il s'est avéré que ce phénomène provenait de la dureté différente des parties intérieure et extérieure de la pointe. La partie intérieure moins dure de la dent s'use plus rapidement que la partie extérieure. De ce fait, se forme une pointe aigüe avec un angle très efficace trouvé par la nature.

⁸⁸ *Знание - сила*, 1986, № 4, с.7

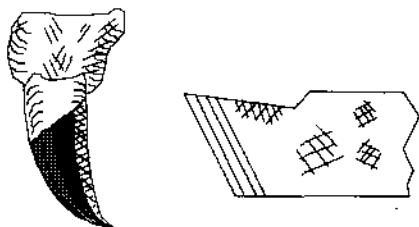


Fig. 35. Principe d'auto-affûtage des dents et des griffes est à la base des ciseaux multicouches d'A.M. Ignatiev.

Le fait même de passer d'une mono-substance vers une substance à plusieurs couches s'avère utile. Si, en plus, on dote chaque couche de propriétés particulières, il est possible d'obtenir un gain considérable dans la FUP. Par exemple, l'Institut des problèmes physiques et techniques du Nord a conçu de cette manière des panneaux d'isolation thermique multicouches dix fois plus fins et plus légers que des panneaux homogènes. Le même principe peut être utilisé pour neutraliser d'autres processus relatifs aux ondes (acoustiques, optiques, radioélectriques, élastiques) : chaque frontière entre deux milieux pourvus de propriétés différentes joue le rôle de source pour les ondes réfléchies et réfractées ; en interagissant avec une onde incidente, elles forment une image interférentielle et se neutralisent (*Progrès scientifique et technique : problèmes et solutions*⁸⁹, 1986, №22, p. 3).

L'Institut polytechnique de Donetsk a élaboré des procédés technologiques de fabrication de pièces dotées de propriétés variables dans l'espace (*Inventeur et innovateur*⁹⁰, 1983, №10, p. 26). Les auteurs affirment qu'il est possible de fabriquer des pièces dont les propriétés physiques et mécaniques varient dans l'espace, progressivement ou par à-coups, conformément aux conditions de fonctionnement de ces parties. Par exemple, le tourillon d'un arbre doit être particulièrement résistant à l'usure, tandis que l'arbre lui-même doit résister à des sollicitations alternées. En conséquence, les tourillons doivent contenir plus de chrome ou de molybdène, et la partie centrale de l'arbre doit contenir plus de nickel. Dans l'idéal, chaque pièce devrait être une sorte de mosaïque où, dans n'importe quelle zone, la composition chimique et les propriétés devraient correspondre au caractère des charges.

Après la division de la substance en zones fonctionnelles, commence le processus de leur spécialisation – chaque zone remplit une seule fonction. La spécialisation permet d'assurer plus facilement la croissance de la fonction utile de chaque zone et de l'objet technique dans son ensemble.

Une entreprise italienne, Pirelli, a conçu des pneus dotés de sculptures asymétriques assurant une bonne adhérence sur route sèche et plane comme sur route enneigée et verglacée. Un tel pneu se compose de deux parties différentes. La partie intérieure est dotée d'une sculpture destinée à rouler sur la neige et le verglas et est fabriquée en caoutchouc qui contient plus de silice (ce qui assure une meilleure adhérence avec la route) ; la partie extérieure du pneu possède une sculpture destinée à rouler sur une route sèche et plane et son caoutchouc contient plus de suie de gaz qui crée des meilleures conditions pour rouler à grande vitesse. Malgré l'asymétrie du protecteur et une composition hétérogène de caoutchouc, ces pneus s'usent uniformément et la firme garantit un parcours de 64 000 km avant l'usure du pneu (*Nouveautés dans la vie, la science et la technique*⁹¹, série "Technique", 1982, №4, p. 28).

⁸⁹ НТР: проблемы и решения, 1986, № 22, с.3

⁹⁰ Изобретатель и рационализатор, 1983, № 10, с.26

⁹¹ Новое в жизни, науке, технике, серия "Техника", 1982, № 4, с.28

Les phares d'une automobile sont disposés de manière à éclairer la route devant la voiture. Pour des raisons de sécurité, il ne serait pas inutile d'avoir un phare supplémentaire qui éclairerait quelque peu vers le haut et sur le côté, illuminant ainsi les panneaux routiers qui se trouvent sur le bord de la route. Dans le brevet britannique № 1 486 587, il est proposé de réunir les deux fonctions dans un seul phare. Pour cela, sur la face intérieure du phare on effectue une saillie sous forme de prisme. Le prisme est calculé de telle façon que lorsqu'on allume les feux de croisement une partie du faisceau lumineux du phare s'écarte sur le côté et vers le haut en éclairant les panneaux routiers jusqu'à 25 mètres du véhicule.

Un problème encore plus sérieux est celui de l'éblouissement des conducteurs par les véhicules venant d'en face. Dans le monde entier environ 400 brevets sur les moyens d'éviter l'éblouissement ont été déposés (*Inventeur et innovateur*⁹², 1981, №6, p. 18). Cependant, pas une seule de ces innovations n'a été retenue par la commission de la sécurité routière de l'ONU pour une utilisation obligatoire et universelle. Toute sorte de lunettes diminue la visibilité. Les photodiodes qui réduisent l'intensité de la lampe dès l'apparition d'un flux lumineux en face ou qui actionnent des obturateurs exigent de revoir la conception des phares, sont complexes et pas tout à fait fiables. Les verres polaroïd et les filtres nécessitent de multiplier par quatre l'intensité de la lumière. Par ailleurs, ces verres sont assez coûteux et recherchés. Donc, le seul moyen jusqu'à présent de lutter contre l'éblouissement est de se mettre en feux de croisement, en comptant sur la politesse des conducteurs les uns envers les autres. Ce problème est résolu dans le brevet № 520 487 où l'on propose un phare qui dévie le flux lumineux et ainsi n'éblouit pas le conducteur du véhicule venant d'en face (fig. 36).

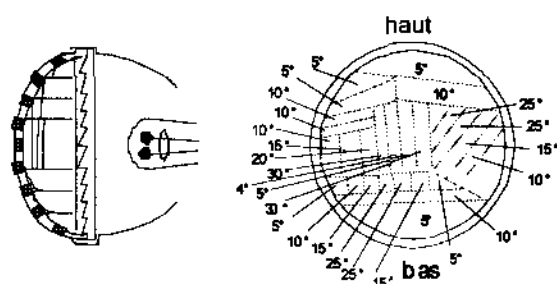


Fig. 36. Schéma d'un phare avec un "échelon prismatique" selon le brevet № 520 487.

Dans la demande de brevet français № 2 595 659, on décrit un moyen de mettre en valeur les propriétés esthétiques de liquides contenus dans des récipients en matières plastiques ou en verre à des fins commerciales. On forme dans les parois d'un flacon ou d'une bouteille divers éléments optiques, lentilles, etc. (fig. 37).

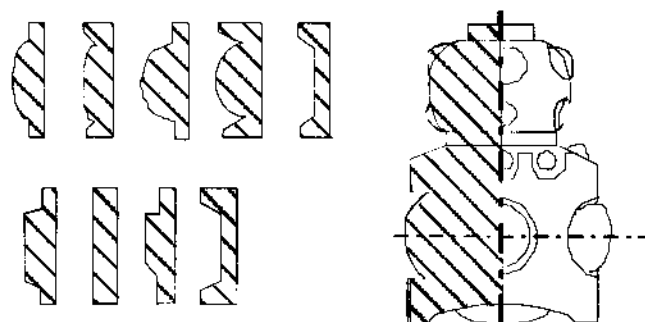


Fig. 37. Le procédé d'utilisation d'un liquide transparent en focalisant la lumière sur le récipient (demande de brevet France № 2 595 659).

⁹² *Изобретатель и рационализатор*, 1981, № 6, с.18

Aux Etats-Unis, on a inventé une "fenêtre holographique" (*Inventeur et innovateur*⁹³, 1987, №11, p. 48). On donne au verre une structure holographique précise qui permet d'éclairer les parties d'une pièce habituellement sombres. Un tel vitrage peut diriger la lumière du jour au plafond plutôt que par terre et éclairer des zones obscures. Le filtrage de rayons infrarouges maintient la fraîcheur dans les pièces. Il est même possible de "pomper" la lumière du jour vers des locaux sans fenêtres par un conduit de ventilation pourvu de parois réfléchissantes et de la diffuser par un orifice dans le plafond.

La spécialisation des zones selon les fonctions réalisées aboutit, en fin de compte, à la division d'une substance hétérogène et au remplacement de certaines de ses parties par une substance avec une fonction utile élevée.

On peut citer l'exemple d'une conception de bouilloire réalisée en trois couches : le support en cuivre pour assurer une bonne conductibilité de la chaleur est recouvert à l'intérieur d'une fine couche de téflon qui évite la formation de dépôts et à l'extérieur d'une couche protectrice brillante obtenue par dépôt électrochimique.

Au Japon, on a élaboré une nouvelle lime en acier non trempé bon marché dont les aspérités sont couvertes d'une couche de céramique extrêmement dure (carbure de vanadium). Une couche de 3 mm protège la lime de la corrosion, permet de travailler des alliages durs et accroît d'un facteur 5 à 6 sa durée de vie (*La technique pour les jeunes*⁹⁴, 1987, № 2, p. 48).

En France, on a conçu des accumulateurs au plomb dont la masse est quatre fois plus faible que celle des batteries classiques : dans ces accumulateurs, seule une couche fonctionnelle de plomb appliquée sur les fibres de verre et de carbone a été conservée (*La connaissance est notre force*⁹⁵, 1983, № 8, p. 40).

Dans les grandes villes, les surfaces en verre se salissent si rapidement que même des nettoyages fréquents ne permettent pas de les maintenir propres durant un temps prolongé. En France, a été conçu un produit appelé "Isolverre" qui, après application sur une surface vitrée propre et sèche, empêche les traces d'eau de pluie, le dépôt des particules salissantes et la formation du givre. Etant chimiquement neutre, le produit résiste à l'action des nettoyants. Un litre suffit pour traiter une surface de 100 à 120 m² (*A l'étranger*⁹⁶, 1987, № 28, p. 20).

Nous ne disposons pas toujours de substances qui réalisent d'elles-mêmes une fonction nécessaire, autrement dit, qui "fonctionnent" avec leur propre énergie ou avec l'énergie du système. Dans ce cas, la substance se voit ajouter un sous-système de service.

Les conducteurs tout comme les piétons savent qu'il est difficile de distinguer le signal du feu tricolore par un temps ensoleillé. Réfléchi par des verres colorés, la lumière du soleil crée un faux signal. De ce fait, ont été déposés des brevets de feux tricolores munis de rideaux noirs : dès qu'une lanterne (par exemple rouge) s'éteint, son verre se ferme par un rideau noir automatique, alors que le rideau d'une autre lanterne (par exemple jaune) s'ouvre. Selon le brevet britannique № 1 454 386, le verre de la lanterne est recouvert d'une pellicule de cristaux liquides et pourvu de deux électrodes sur les côtés ; quand la lampe est éteinte, les cristaux liquides ne laissent pas passer la lumière et créent une surface noire mate ; lorsque la lampe s'allume, le champ électrique produit par le courant réoriente les molécules des cristaux et le rideau devient transparent.

⁹³ *Изобретатель и рационализатор*, 1987, № 11, с.48

⁹⁴ *Техника молодежи*, 1987, № 2, с.48

⁹⁵ *Знание - сила*, 1983, № 8, с.40

⁹⁶ *За рубежом*, 1987, № 28, с.20

Une entreprise anglaise produit des tournevis d'une longueur de 280 mm qui, pour faciliter le travail, sont dotés d'un dispositif d'éclairage. Dans le manche de ces tournevis est intégrée une ampoule miniature dont la lumière est acheminée au moyen de quatre fibres optiques vers l'extrémité aplatie métallique de tournevis afin de créer un faisceau étroit. L'ampoule est alimentée par deux piles miniatures (*Nouveautés dans la vie, la science et la technique*⁹⁷. Série "Technique", 1982, № 4, p. 9).

Tôt ou tard, les sous-systèmes ou les substances composées doivent de nouveau se réduire en une substance. Une substance, qui a passé un cycle de croissance – décroissance et qui a acquis une nouvelle propriété assurant une FUP élevée dans un système technique concret, peut être appelée *substance idéale du premier niveau (SI¹)*.

Il est établi, par exemple, que la lumière ultraviolette présente des effets néfastes sur les plantes. Les plantes de serre sont particulièrement sensibles aux rayons ultraviolets. Sachant cela, les spécialistes du monde entier couvrent les toits des serres par un film supplémentaire filtrant la lumière. Absorbés, les ultraviolets se transforment en chaleur. Il est également établi que la lumière avec une longueur d'onde se trouvant dans le spectre rouge-orange agit d'une manière bienfaisante sur toutes les plantes. Elles la transforment mieux en énergie chimique au cours de leur activité. Cependant, couvrir les serres par un film supplémentaire est tout simplement impossible car la transmission de la lumière baisserait trop considérablement. De même, ont échoué les tentatives de donner au verre deux propriétés différentes : ne pas laisser passer les ultraviolets et favoriser le passage des infrarouges.

Le problème a été brillamment résolu dans les années quatre-vingt à l'Institut M.S. Kournakov en proposant un film qui transforme le rayonnement ultraviolet en rayonnement infrarouge. En d'autres termes, on a supprimé un facteur nuisible et ajouté un facteur utile. Le rôle du transformateur de rayonnement est rempli par une substance luminophore à base d'euporium que l'on incorpore à faible dose dans un polymère. Le film ainsi obtenu, portant le nom "Polysvétan", a conduit, contre toute attente, à une augmentation considérable de la récolte : 50 % pour les tomates et les concombres ; 20 % pour les salades et 60 % pour les pastèques ! (*Nouveautés dans la vie, la science et la technique*⁹⁸. Série "Technique", 1987, №5, p. 62).

4.11.4. Réduction des systèmes : aspect général

A la suite de la période de croissance, le système technique franchit une nouvelle étape de transformation qui affecte en profondeur la structure, l'organisation et les propriétés systémiques du ST. Ce processus est représentatif de la loi d'augmentation du degré d'idéalité : le système technique diminue ses paramètres (M, D, E) en augmentant simultanément la FUP.

Le système technique qui a atteint le point de croissance maximale peut théoriquement suivre plusieurs voies de réduction (fig. 38) :

13. passage de certains sous-systèmes dans le super-système,
14. évolution des sous-systèmes au sein du ST,
15. réduction du ST en un des sous-systèmes,

⁹⁷ *Новое в жизни, науке, технике. Серия "Техника", 1982, № 4, с.9*

⁹⁸ *Новое в жизни, науке, технике. Серия "Техника", 1987, № 5, с.62*

16. réduction du sous-système – ST en une substance idéale.

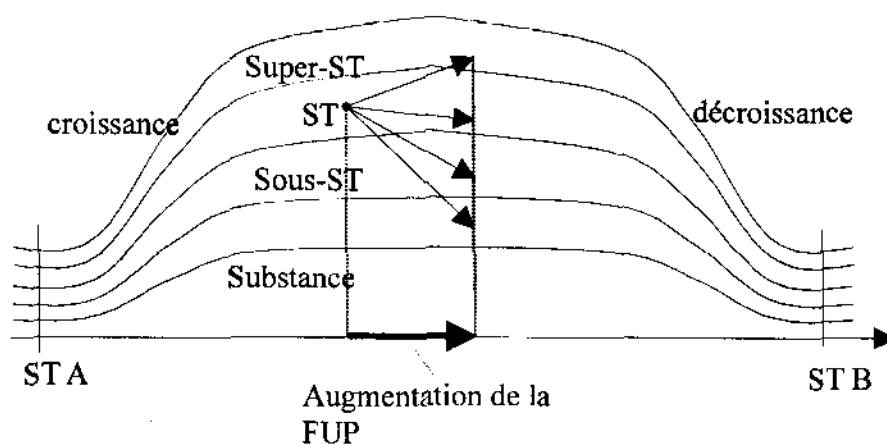


Fig. 38 Voies éventuelles d'idéalisation des ST

Dans l'évolution des ST réels, les processus de réduction sont le plus souvent mixtes : on voit évoluer et s'idéaliser l'une ou l'autre partie du système, appartenant à des niveaux hiérarchiques différents. Si l'on représente sur un graphique les points d'évolution d'un système dans le temps en les joignant par des lignes, le dessin se ressemblera au mouvement brownien d'une particule. L'incohérence apparente d'une telle évolution est due à l'apparition inopinée d'une contradiction dans une partie du système et à sa brusque aggravation. En d'autres termes, ce processus correspond à la loi de développement inégal des parties d'un système.

Les quatre voies aboutissent à un nouveau système B qui remplit une FUP identique à celle du système initial A. Le nouveau système B est doté de paramètres (M, D, E) minimaux et d'une FUP élevée.

4.11.4.1. Première voie de réduction – migration de certains sous-systèmes en dehors du ST suivie de leur fusion en systèmes spécialisés au sein du super-système.

Cette voie se caractérise par les particularités suivantes :

- le nombre d'éléments dans le ST diminue,
- les paramètres (M, D, E) du ST diminuent,
- l'augmentation de la FUP du ST est réalisée de deux manières :
 17. le système "s'allège" (il n'a plus besoin d'être universel), sa structure et son organisation se simplifient, son fonctionnement s'améliore ;
 18. la fonction d'un sous-système transféré hors du ST est remplacée par une fonction identique de qualité supérieure fournie par le super-système, car au sein du super-système, l'ancien sous-système devient un système spécialisé.

Le nombre d'éléments dans un ST peut diminuer jusqu'à un certain seuil, atteint lorsqu'il ne reste plus que l'organe de travail. Pour remplir la FUP, les systèmes doivent alors être réunis en un super-système.

Par exemple, dans une évolution du ST "automobile-route", l'automobile pourrait se réduire uniquement au siège du conducteur. Toutes les autres parties du ST seraient réunies

avec la route, constituant de cette façon des systèmes centraux spécialisés, tels que système de distribution d'énergie, de commande, de direction, etc.

Le système "centralisé" devient un système d'usage collectif auquel font appel constamment ou périodiquement tous les ST. Parmi les fonctions de tels ST centralisés, figurent des services de commutation, de fourniture d'énergie (convertisseur d'énergie), de suivi, de commande, de maintenance.

Les sous-systèmes "centralisés" et passés dans le super-système, remplissent au début les mêmes fonctions que celles qu'ils effectuaient dans le ST. Cependant au fur et à mesure que le nombre de ST interagissant avec le ST augmente, les fonctions commencent à changer, car les changements quantitatifs aboutissent inéluctablement à des changements qualitatifs. Avec le temps, ces différences s'accroissent, les fonctions se métamorphosent et les systèmes se chargent de la réalisation d'autres fonctions.

Pendant la période de réduction, des processus d'intégration caractérisent également les super-systèmes. Les premiers à se réunir sont les systèmes ayant des FUP proches, par exemple, les systèmes informatiques, énergétiques, agricoles, médicaux, de transport, etc. Cette fusion est préparée par les modifications précédentes des systèmes d'usage collectif qui, au cours de leur évolution et de l'adjonction d'autres fonctions, se rapprochent et s'unifient. Cela crée des conditions pour intégrer plusieurs super-systèmes en un seul. Ce processus est accompagné par la disparition de nombreux éléments et parties.

Enfin, le gain en FUP (c'est-à-dire en nombre de fonctions) est possible grâce au passage des sous-systèmes dans un super-système et à l'intégration ultérieure des sous-systèmes au moyen de l'apparition d'une nouvelle propriété systémique.

Les premiers postes téléphoniques étaient pourvus de commutateur, de sources d'énergie, de câbles qui reliaient chaque abonné. Dès 1878, est apparu le premier central téléphonique (New Haven, Connecticut, Etats-Unis) doté d'un panneau vertical avec des fiches de contact destinées à relier les abonnés. Ces réseaux locaux se sont vite répandus dans les villes. Puis l'on a vu apparaître des lignes reliant les villes et les pays qui ont nécessité la mise en place d'amplificateurs intermédiaires, de commutateurs automatiques et d'une multitude d'autres dispositifs. Les téléphones tels qu'ils sont aujourd'hui disposent de fonctions variées parmi lesquelles figurent le répondeur, le fax, les mémoires, l'affichage des numéros appelés, etc. Le processus de croissance et d'ajout de nouvelles fonctions dans ce système continue. En même temps, on voit se dérouler le processus de réduction des sous-systèmes et de leur passage vers le super-système. A titre d'exemple, le super-système, que constitue le réseau de satellites de la Terre, a intégré de nombreuses fonctions des systèmes techniques du réseau téléphonique terrestre. En conséquence, la nécessité de la majeure partie des centraux téléphoniques, commutateurs, amplificateurs, câbles, etc. a disparu.

Le réseau téléphonique en tant qu'un des systèmes d'information (radio, télévision, réseaux informatiques, poste, etc.) devra fusionner avec d'autres systèmes identiques en un système d'information unique.

Voici encore deux exemples d'évolution possible des systèmes informatiques (Démentiev G.P. et al. *Les bases physiques et techniques de conception et d'utilisation des appareils spatiaux*⁹⁹. M. : Mashinostroïenié, 1987).

Aux Etats-Unis, on a élaboré un projet de transformation de la poste. Un seul satellite permet de couvrir tous les bureaux de poste sur 50 % du territoire des Etats-Unis, d'Alaska et

⁹⁹ Дементьев Г. П. и др. *Физико-технические основы создания и применения космических аппаратов*. М.: Машиностроение, 1987

des îles Hawaï. Le débit de transmission du système peut atteindre 100 milliards de pages de texte par jour (remplacement des lettres sur support papier en lettres électroniques). Les bureaux de poste seraient pourvus d'antennes d'un mètre de diamètre fixées sur les toits des bâtiments. Ensuite, ces antennes pourraient être mises à la disposition des particuliers ce qui rendrait l'existence même des bureaux de poste inutile.

Il existe également un système permettant d'analyser les signaux issus de différents capteurs de surveillance (acoustiques, infrarouges, de contact, de pression, etc.). Ce système comprend un satellite de 7,3 tonnes doté d'une antenne de 60 mètres de diamètre. Dans un tel système, lorsqu'un capteur au sol est activé un émetteur doit produire des signaux codés d'une puissance 1 μ W. Ces signaux reçus par le satellite subissent un traitement en vue de réduire la probabilité d'une fausse alerte et sont retransmis à un centre de surveillance afin de prendre les mesures nécessaires. Un satellite est capable de retransmettre chaque seconde les signaux de plus de trois millions de capteurs installés dans diverses localités des Etats-Unis (il deviendrait ainsi un Surveillant Universel). Le nombre total de capteurs peut atteindre des dizaines de milliards. Voici quelques exemples d'application de ce système : surveillance dans des lieux privés ou publics, contrôle de paramètres en tout point des réseaux énergétiques, contrôle du débit de fluides et de gaz dans des conduites, de l'humidité du sol dans des régions agricoles, prévision des inondations, des glissements de terrain, etc.

4.11.4.2. Deuxième voie de réduction – évolution (principalement la miniaturisation) de tous les sous-systèmes au sein d'un ST donné, sans passage des sous-systèmes dans un super-système

Les particularités de cette voie d'idéalisation sont :

- ❑ *la réduction* des paramètres (M, D, E) grâce à la miniaturisation (une brusque diminution des dimensions (D) entraîne celle de M et E) ;
- ❑ *l'augmentation* de la FUP par l'accroissement de la précision de fonctionnement (la longueur des liens diminue, cela réduit la probabilité d'erreurs, la puissance requise baisse, une partie de facteurs néfastes disparaît) ;
- ❑ *le nombre d'éléments du système reste constant* jusqu'au dernier moment – jusqu'à la fusion des sous-systèmes en un seul mono-système fonctionnel.

L'exemple le plus démonstratif de la micro-miniaturisation dans la technique est l'évolution de l'électronique au XX^e siècle. Si une Rolls-Royce des années 50 s'était perfectionnée aussi vite que l'électronique, cette automobile de luxe coûterait aujourd'hui deux dollars, aurait une cylindrée d'un demi cm³ et ne consommerait que 10⁻³ mm³ d'essence pour un km.

L'évolution des systèmes électroniques a emprunté la voie d'une brusque diminution des paramètres (M, D, E) suivant l'enchaînement suivant : pièces séparées – assemblages – micro-assemblages – microcircuits électroniques intégrés – grands microcircuits électroniques intégrés – super grands microcircuits électroniques intégrés. Par ailleurs, au cours de l'évolution la nature des composants a peu varié : il s'agit toujours d'un ensemble d'éléments résistifs, capacitifs, semi-conducteurs et inductifs. Ce n'est que très récemment que sont

appareus des signes de transition vers des éléments basés sur de nouveaux principes (construction de blocs électroniques sous forme de monocristaux, biochip¹⁰⁰...).

L'évolution du ST "machine à laver" :

- ❑ un tonneau équipé d'un agitateur (moteur électrique, aube), d'un tuyau flexible et d'un couvercle ;
- ❑ puis sont apparus des sous-systèmes remplissant les fonctions de chauffage, de vidange, de vitesse variable, d'essorage, de séchage, de programmation, etc. ;
- ❑ miniaturisation – machine à laver "Malutka"¹⁰¹ ;
- ❑ cas extrême : conseil extrait d'une rubrique "Bricolage" – une perceuse électrique avec une aube et une bassine remplie de linge (la machine à laver est absente, alors que sa fonction est remplie) ;
- ❑ l'agitation mécanique du linge n'est plus assurée par l'intermédiaire d'un moteur électrique mais à l'aide d'un générateur d'ultrasons (cette idée est utilisée depuis longtemps pour nettoyer des pièces mécaniques) ; les tests ont donné d'excellents résultats : il faut placer dans un récipient le linge, la poudre de lavage, l'eau et le générateur d'ultrasons conditionné dans un petit boîtier ;
- ❑ aux activateurs mécaniques à l'échelle macroscopique (moteur+agitateur) et microscopique (ultrason) doivent succéder des activateurs chimiques (nettoyage chimique).

La réduction de l'imprimerie : le livre choisi est imprimé directement dans la librairie en présence du client. Le texte et les illustrations sont copiés d'un disque optique et imprimés sur une imprimante laser en quelques minutes, puis sont reliés par un dispositif automatique de reliure (*Science et vie*¹⁰², 1987, № 6, p. 104).

Nanotechnologie d'Eric Drexler : utopie technocratique ou une étape d'évolution de la technique conforme aux lois ?

L'article de B. Ponkratov (avec quelques raccourcis) "Ce que nous allons faire dans le troisième millénaire, ou la dernière utopie technocratique" (*La technique pour les jeunes*¹⁰³, 1989, № 12, p. 18-22)

Au printemps 1977, Eric Drexler, un étudiant du MIT (Massachusetts Institute of Technology) a avancé l'idée qu'il est nécessaire de faire passer les systèmes techniques du macro- au micro-niveau par la conception de machines moléculaires utilisant des molécules artificielles à l'image des molécules biologiques fonctionnant dans des cellules vivantes.

¹⁰⁰ [NDT] : Anglicisme. Technique (électron.). Petite pastille de silicium (non encapsulé). - Équivalent français. : puce. Les chips d'un microprocesseur. "Au royaume des semiconducteurs et de leurs applications à la microélectronique, le silicium est roi. On ne parle que des chips, des circuits intégrés, etc., en silicium" (*la Recherche*, mai 1980, p. 580).

¹⁰¹ [NDT] : Machine à laver portative.

¹⁰² *Наука и жизнь*, 1987, № 6, с.104

¹⁰³ *Техника - молодежи*, 1989, № 12, с.18-22

A partir de la fin des années soixante-dix, E.K. Dreksler, entouré d'un petit groupe d'enthousiastes, a entamé des travaux sur la nanotechnologie à l'Université de Stanford.

Premièrement, ils ont réalisé des expériences avec des structures similaires aux structures biologiques : aminoacides, ferments (catalyseurs des réactions biochimiques), albumines et tissus naturels.

Cependant, ils se rendent compte rapidement que ces structures analogues (et tout ce qu'elles sont capables de créer) relève de l'organique ; par conséquent, leurs potentialités sont restreintes. Elles perdent la stabilité ou se décomposent sous l'effet de la chaleur et à pression élevée, elles sont incapables de traiter un matériau dur avec une forte précision, d'agir dans des milieux agressifs, etc. Il est également impossible de construire tous les types de nanomécanismes requis au moyen de biomolécules. Donc, il faudra inévitablement utiliser des substances inorganiques et des structures cristallines.

Par ailleurs, pour construire des biomachines, il faudra inventer une immense quantité de nouveaux principes, procédés, dispositifs et substances qui assureraient finalement l'obtention des fonctions requises.

De ce fait, il est insensé de renoncer à une somme grandiose d'idées et de principes élaborés au cours de l'évolution de la technique, en d'autres termes, de renoncer à tout ce que la nature n'a pas pu "inventer", à commencer par la roue et à terminer par l'ordinateur. C'est pourquoi dans ses travaux, Dreksler a argumenté en détail les moyens de conception au niveau atomique d'un palier et d'une transmission par engrenages, il a analysé les problèmes liés au frottement de glissement, etc.

En même temps, sans structures analogues à celles rencontrées dans le monde vivant, il est très difficile de manipuler un à un des atomes et des molécules. En conséquence, les nanomachines doivent réunir en elles les propriétés des systèmes vivants et techniques.

Selon Dreksler, le type principal de machines pourrait porter le nom **d'assembleur**. A partir d'atomes et de molécules bien choisis, cet assembleur devra savoir construire n'importe quel nanosystème : moteurs, "machines-outils", calculateurs, moyens de communication, etc. Il s'agira d'un robot moléculaire universel doté de programmes modifiables stockés sur un média du type A.D.N. ou A.R.N. Le processus de modification d'un programme pourrait alors ressembler à la contamination d'une cellule par un virus.

Dreksler estime que pour remplir ses fonctions un assembleur doit comprendre à peu près 10 000 parties constituantes mobiles et immobiles dont chacune est composée en moyenne d'une centaine d'atomes (environ un million d'atomes correspond approximativement à un trentième d'une bactérie moyenne).

L'aspect extérieur d'un assembleur peut être présenté comme une boîte dotée d'un "bras"-manipulateur long d'une centaine d'atomes. Le manipulateur lui-même est simple, mais il est capable d'employer divers outils de complexité variable. Les outils sont des molécules avec des centres réactionnels actifs, c'est-à-dire avec des parties susceptibles de former des liaisons chimiques stables avec d'autres molécules. A l'intérieur de l'assembleur, sont disposés des dispositifs qui actionnent le manipulateur, remplacent les outils moléculaires dans son organe de préhension et contiennent le programme de toutes les actions.

Tout comme les ribosomes dans une cellule, les assembleurs fonctionneront dans des récipients remplis d'un liquide spécifique riche en matériaux initiaux, en molécules-pièces et en "combustible" – molécules avec une grande réserve d'énergie chimique.

Vraisemblablement, le "bras" attendra tout simplement jusqu'à ce qu'une molécule nécessaire, après être passée par un dispositif de sélection, ne se heurte dans son mouvement chaotique au préhenseur. Les parties actives de tous les ferments fonctionnent selon le même principe. Leur structure est constituée des courbes dont la forme et la dimension correspondent précisément à une molécule requise – et à aucune autre. La vitesse de traitement des ferments rapides atteint un million de particules par seconde à condition que leur concentration dans le milieu soit suffisante.

Ainsi, le cycle de travail d'un assembleur peut se reproduire environ un million de fois par seconde. Cette estimation peut être confirmée par un autre raisonnement indépendant : le "bras" de l'assembleur est à peu près 50 millions de fois plus court qu'un bras humain et, par conséquent, si l'on conserve l'équivalent des charges inertielles, il pourra bouger environ autant de fois plus vite.

Les oscillations thermiques chaotiques des atomes et des molécules comportent un risque considérable pour la nanoingénierie pratique. Elles peuvent empêcher le manipulateur d'un robot de traiter et de disposer les pièces avec une précision requise. Cependant, dans certains cas, elles sont utiles, par exemple quand le manipulateur "attend" un choc aléatoire d'une molécule pour la saisir. Mais pour des opérations précises les oscillations thermiques sont néfastes. Pour cette raison, Dreksler a conçu un très "gros" manipulateur (cône avec un diamètre de 30 nanomètres et long de 100 nanomètres) constitué d'atomes de carbone sur le modèle du réseau cristallin du diamant. Cela le rendra si rigide que ses déformations d'origine thermique n'excéderont pas la moitié du diamètre d'un atome.

Bien sûr, il n'est pas envisageable de contrôler manuellement les assembleurs en raison de leur vitesse vertigineuse de fonctionnement. Le contrôle doit être effectué par des nanoordinateurs programmés dans un langage ordinaire de contrôle de robots industriels.

Il est possible d'effectuer la liaison avec ces machines miniatures par une interface d'un nanoordinateur ou de donner des instructions transmises par ondes électromagnétiques. La lumière pourrait devenir un moyen approprié de contrôle des nanomachines. Il sera possible d'utiliser tout l'assortiment des effets photochimiques et photophysiques connus. A titre d'exemple, la lumière peut modifier la forme de certaines molécules, sachant qu'au cours de ce processus les déplacements des atomes sont réalisés en des durées de l'ordre de 10 à 18 seconde. De surcroît, la lumière peut également devenir une source d'énergie pour les nanoappareils.

Pour ce qui est des nanoordinateurs, Dreksler propose également d'utiliser des principes mécaniques. Il a élaboré une conception d'un calculateur électronique dans laquelle le code binaire est réalisé par deux positions fixes des molécules stables linéaires de carbone constituées de 7 à 8 chaînons d'une longueur de 1 nm. Ces tiges microscopiques glissent dans une matrice rigide suivant des canaux qui se croisent à angle droit de sorte qu'une tige puisse barrer (ou ne pas barrer) le chemin à une autre tige. Trois canaux parallèles traversés par un quatrième suffisent pour former une cellule logique universelle. Un ensemble de telles cellules permet de réaliser n'importe quel processus de calcul ou de traitement d'information.

La mémoire d'une capacité d'un milliard de bits occupera sous cette forme le volume d'une bactérie soit $1 \mu\text{m}^3$. Un cycle de calcul, c'est-à-dire, le temps de déplacement d'une tige d'une position vers une autre, compte tenu de ses dimensions minimales, ne durera que 50 picosecondes. De ce fait, la rapidité de fonctionnement d'un tel système mécanique sera plus élevée que celle des meilleurs micro-ordinateurs modernes.

On peut s'interroger sur la faisabilité de la production de masse des nanomachines de Drexler. Pour le moment, cela paraît très peu rentable. Mais cela ne durera que jusqu'au jour (heureux ou malheureux) où on arrivera à créer un **nanodispositif autoreproducteur**.

A tous ces types de dispositifs, Drexler a donné le nom de "**réplicateur**", c'est-à-dire copieur. Peut-être, ce mot marquera-t-il un jour une nouvelle ère dans l'histoire de l'humanité. Elle commencera le jour où on parviendra à concevoir le tout premier copieur. Cela suffira pour une révolution gigantesque dans tous les domaines de l'activité humaine, que l'histoire n'a, peut-être, pas encore connue.

N'est ce pas aller trop loin ? Regardons.

Imaginons que nous ayons réussi à concevoir un copieur. Supposons qu'il soit 1 000 fois plus complexe qu'un assembleur ; ainsi le nombre d'atomes qui le constituent atteint approximativement un milliard. Dans ce cas, en fonctionnant avec la même productivité plus que modérée d'un million d'atomes par seconde, un copieur assemblera sa copie en mille secondes, c'est-à-dire en un quart d'heure. Cette estimation est toujours confirmée par le raisonnement indépendant suivant : une cellule d'un microbe nécessite à peu près le même temps pour se diviser dans des conditions favorables. Cette nouvelle copie se mettra alors immédiatement à se reproduire. Au bout de 10 heures, la solution comprenant des molécules "énergétiques" et de construction contiendra déjà 70 milliards de copieurs, et en moins de 24 heures leur masse dépassera une tonne. Cette tonne de dispositifs extrêmement complexes est obtenue au cours de 24 heures sans aucune dépense de main-d'œuvre humaine. Il est possible toutefois d'obtenir la deuxième tonne non pas en 24 heures, mais seulement en 15 minutes – il suffit de l'approvisionner en substances énergétiques et de construction. Le problème de prix ne se pose plus. En s'endurcissant quelque peu et après avoir cultivé en une semaine une autre masse requise de copieurs, il est possible de les faire construire d'eux-mêmes le pont sur le détroit de Bering, par exemple.

Le plus important, bien sûr, n'est pas de battre des records de quantité. Une fois cette nouvelle ère venue **disparaîtra la nécessité de toute main-d'œuvre qualifiée**.

Voilà, par exemple, la manière dont Drexler décrit en détail comment construire, ou plus exactement, comment cultiver un moteur de fusée à l'aide de copieurs.

Le processus se déroule dans un récipient au fond duquel il y a un support. Le couvercle du récipient se ferme hermétiquement et les pompes le remplissent par un liquide visqueux contenant sous forme de suspension des copieurs programmés sur les nouvelles fonctions des assembleurs.

Au centre du support se trouve un "embryon" – un nanoordinateur qui conserve dans sa mémoire tous les schémas du futur moteur et qui est muni d'un espace sur sa surface où pourront "se déposer" des assembleurs contenus dans la suspension bouillonnante qui entoure l'embryon. Chaque assembleur reçoit une

information sur l'emplacement par rapport à l'embryon qui lui est affecté dans l'espace et l'ordre de saisir par ses manipulateurs quelques autres assembleurs de la suspension. Ils se connectent également à l'ordinateur de "l'embryon" et reçoivent des instructions analogues. En quelques heures, se dresse au sein du liquide une sorte de structure cristalline qui trace dans le moindre détail la forme du futur moteur.

Les pompes se mettent à nouveau en marche en remplaçant dans le récipient la suspension d'assembleurs par une solution de matériaux de construction. L'ordinateur de l'embryon donne un ordre et une partie des constructeurs composant la carcasse laissent partir ses voisins, rangent leurs manipulateurs et s'en vont également avec le liquide en laissant des passages et des canaux qui seront remplis par les molécules et les atomes requis.

A l'aide d'antennes spécifiques mobiles, les assembleurs restants créent dans les canaux un flux constant de liquide qui contient le "combustible" et les matériaux initiaux et qui élimine de la zone de travail les déchets et la chaleur. Le système de liaison sous la forme d'un circuit fermé sur l'ordinateur de l'embryon transmet des instructions à chaque constructeur.

Là où il faut le plus de rigidité, les assembleurs réunissent les atomes de carbone pour former une structure analogue à celle du diamant. Là, où la résistance à la chaleur et à la corrosion est critique, ils créent à la base de l'alumine les structures du réseau cristallin du saphir. Dans les endroits où les contraintes ne sont pas importantes, les assembleurs économisent le poids de la construction en remplissant moins les pores. Ainsi, dans tout le volume du futur moteur, atome par atome, sont bâtis des clapets, des compresseurs, des détecteurs, etc. Tout le travail prendra moins de vingt-quatre heures et un minimum d'attention humaine.

En fin de compte, l'objet obtenu, à la différence des moteurs classiques, n'a aucun joint et gagne environ 10 fois en masse par rapport aux conceptions modernes. Selon la structure, il ressemble plutôt à une pierre précieuse.

Mais ce ne sont encore que les possibilités les plus simples de la nanotechnologie. La théorie nous dit que les moteurs de fusée fonctionneraient de manière optimale s'ils pouvaient changer leur forme en fonction du régime. Cela pourra devenir réalité uniquement grâce à la nanotechnologie. Une construction plus solide que l'acier, plus légère que le bois pourra, par analogie avec les muscles (en utilisant le même principe des fibres glissant) s'étirer, se contracter et se courber en modifiant la force et la direction de l'effort.

Le vaisseau spatial pourra se transformer totalement en environ une heure. La nanotechnique intégrée dans le scaphandre de cosmonaute et assurant le cycle biogéochimique permettra à l'homme de rester dans l'espace un temps indéterminé en transformant en plus l'enveloppe du scaphandre en un "multiplicateur de force". Ainsi s'ouvrira une ère nouvelle dans la conquête de l'espace.

Mais cela ne s'arrêtera pas là ! Les assembleurs fabriqueront pratiquement tout en se servant quasiment de rien, en utilisant toute ressource disponible en quantité illimitée, notamment l'eau et l'air qui contiennent les principaux éléments nécessaires – carbone, oxygène, azote, hydrogène, aluminium et silicium ; les autres éléments, tout comme pour les organismes vivants, seront nécessaires en micro-quantités. Les productions auxiliaires et tout le secteur primaire disparaîtront, alors que les objets de consommation seront confectionnés directement "à la maison".

La nanotechnique pourrait rétablir la couche d'ozone, décontaminer le sol, les rivières, l'atmosphère, les océans, démonter les usines, les digues, les mines, mettre les déchets radioactifs dans des conteneurs éternels autoreconstituables. Les villes et les routes pourraient pousser comme de l'herbe. Les déserts pourraient se couvrir de forêts en éléments photosynthétiques qui procureront une quantité nécessaire d'énergie électrique, de substances alimentaires et de combustible biologique universel – ATP (adénosine triphosphate). Les traces de l'activité industrielle pourraient disparaître quasiment de la surface de la Terre, les champs se réduire, les vergers et les écosystèmes naturels couvrir la majeure partie de la planète ...

Une nouvelle révolution scientifique pourrait avoir lieu. Des dispositifs comparables en taille avec celle des assembleurs, un équipement scientifique et des modèles de nature pourraient être conçus et réalisés en "métal" en quelques secondes. Ils pourraient permettre d'effectuer simultanément et à une grande vitesse des millions d'expériences parallèles de toute complexité dont les résultats pourraient être généralisés et apportés sous une forme requise par une intelligence artificielle.

L'éducation pourrait devenir totalement différente. Les enfants posséderont des nanoconstructeurs de poche qui pourraient créer des modèles mobiles d'animaux, de machines et des processus cosmiques qui pourraient être contrôlés. Des nanomachines récréatives et éducatives pourraient ouvrir l'accès à la connaissance mondiale ou développer selon un programme individuel les capacités intellectuelles.

La médecine pourrait devenir méconnaissable. En vérifiant successivement et en "corrigeant" s'il le faut les molécules, cellule par cellule, organe par organe, les nanomachines pourraient permettre de rétablir la santé de n'importe quel malade et ensuite ne laisser tout simplement aucune maladie ni pathologie, y compris génétique.

Le concept même de travail tel que nous l'entendons aujourd'hui pourrait changer. Les notions actuelles de valeur, de prix et d'argent seraient également dépourvues de leur sens. Selon Dreksler, dans cette société idéale totalement régénérée se réalisera une véritable Utopie qui n'a rien à voir avec celles proposant la recette du bonheur collectif dans des foyers communautaires. Bien au contraire, chaque individu aura une diversité maximale de variantes d'existence, la possibilité de choisir à sa guise son mode de vie, d'expérimenter, de se tromper et de recommencer à zéro.

Cependant, Dreksler n'est pas naïf. Conscient que la réalité de l'être nanotechnologique ne sera peut-être pas aussi radieuse que prévue, il essaie d'imaginer d'éventuelles complications et d'esquisser des solutions.

La conception d'Eric Dreksler est un bel exemple d'élaboration d'idées d'idéalisation de la technique dans "l'innovation spontanée", un modèle de découverte et de formulation d'un Objectif digne, d'une solution ingénieuse d'un problème scientifique.

4.11.4.3. Troisième voie – transformation d'un ST en un des sous-systèmes (généralement en organe de travail)

La réduction est un cumul successif d'éléments du système :

- ❑ *le sous-système se charge de la fonction remplie par une substance du ST (et cette substance s'exclue du ST) ;*
- ❑ *cumul de deux sous-systèmes en un seul (de ce fait, un sous-système disparaît) ;*

- ❑ *cumul de plusieurs sous-systèmes en un seul ;*
- ❑ *réduction du ST en un des sous-systèmes.*

Souvent les sous-systèmes possèdent déjà des propriétés analogues aux propriétés des substances utilisées dans l'une des parties du ST donné. Il ne reste qu'à éliminer cette substance en "chargeant" le sous-système de sa fonction. Si un sous-système ne possède pas la propriété nécessaire, il faut le modifier dans la voie requise.

Voilà quelques exemples :

- ❑ en Australie, on a inventé des transformateurs photoélectriques solaires réalisés sous forme de tuiles en plastique transparent avec des piles incorporées ; elles se fixent sur le toit de la même manière que les tuiles en céramiques, en ciment ou en acier ;
- ❑ au Japon, on a commencé à produire des piles électriques d'une épaisseur n'excédant pas 0,1 mm sur un électrolyte dur ; on propose d'installer ces piles directement dans le corps du dispositif ou de l'appareil (c'est-à-dire le fabriquer "en piles") ;
- ❑ au Japon, on fabrique des antennes de télévision domestiques en forme de calendrier mural ; une partie des dessins est imprimée avec de la peinture métallisée ou réalisée en papier aluminium très fin ;
- ❑ en Russie, on a conçu une cuisinière électrique sans foyers de cuisson (plaques à induction), leur rôle est joué par le fond de n'importe quel récipient métallique ; pour cela il a fallu introduire un transformateur de fréquence (de 50 Hz jusqu'à 20 kHz) à thyristors, on conduit le courant sur la première bobine du transformateur et on utilise comme deuxième bobine le fond des ustensiles de cuisine, le rendement obtenu atteint 80 % (le rendement d'une cuisinière classique n'excède pas 20 %).

Lors du cumul des sous-systèmes, l'un d'eux devient "principal" et se charge d'une fonction supplémentaire (du deuxième sous-système). Si l'un des sous-systèmes est un organe de travail, alors c'est ce sous-système qui reste et qui continue à se perfectionner. D'autres sous-systèmes semblent "se concentrer" autour de l'OT, ils se disposent sur sa périphérie et fusionnent avec lui :

- ❑ un constructeur automobile a conçu un tableau de bord destiné aux véhicules de demain. Ce tableau de bord est monté sur le volant, les boutons sont disposés à une distance qui permet de les atteindre avec les doigts ;
- ❑ au Japon, on a conçu un tour doté d'un variateur de vitesse électronique (la transmission, les roues dentées, les arbres et les accouplements ont disparu), dans lequel le moteur électrique est accouplé directement à l'arbre de la machine-outil ;
- ❑ au Japon, on a conçu un moteur hors-bord à commande électrique (demande de brevet № 59-34 558) : le hors-bord et l'hélice sont isolés, rapprochés au maximum et placés sur une console en dehors de la coque ;
- ❑ en ex-Allemagne de l'Ouest, a été conçu, dans une demande de brevet № 3 312 063, un propulseur intégré. Le propulseur d'un navire doit avoir un grand diamètre et tourner à faible vitesse, tandis qu'un moteur électrique classique tourne à grande vitesse et possède un faible diamètre du rotor. De ce fait, on utilise des réducteurs et des arbres encombrants qui subissent des charges alternées importantes. On propose de réunir le moteur avec l'organe de travail – c'est-à-dire

le propulseur. Le moyeu de ce propulseur est composé d'aimants permanents en cobalt et samarium, le stator est réalisé sous forme d'un cercle enfermant les extrémités des pales d'une hélice ; ceci permet une forte baisse des paramètres (M, D, E) et du niveau de bruit, facilitant ainsi la maniabilité du bateau. De ce fait, un modèle avec une hélice d'un diamètre 2,5 m et d'une puissance de 750 W est en cours de conception.

Dans des systèmes de mesure, l'OT est composé d'un capteur. C'est pourquoi la réduction des ST de mesure tend vers la fusion de toutes les parties avec le capteur. Par exemple, un capteur intégré se présente sous la forme d'un cristal de silicium dans lequel sont réunis un élément sensible et un circuit électronique de traitement du signal. Ce type de capteurs a des valeurs des paramètres (M, D, E) très faibles et une FUP importante.

Si l'on considère les prisons comme ST, on se rend compte que de tels ST se réduisent également. Aux Etats-Unis, en raison de la surpopulation carcérale, la mise en détention à domicile des personnes qui n'ont pas commis de crimes très graves est assez largement répandue dans 35 Etats. Pour contrôler leur présence chez elles, on utilise des moyens électroniques. Il existe deux types de contrôle – actif et passif – appliqués aux détenus suivant la gravité des infractions pour lesquelles ils ont été condamnés. Les moyens actifs fonctionnent en permanence et sont composés d'un émetteur incorporé dans un bracelet inamovible fixé à la cheville du détenu et de récepteurs installés dans son appartement qui se mettent en marche à n'importe quel moment et transmettent des signaux par téléphone sur les ordinateurs du commissariat de police. La masse de l'émetteur est de 70 g. Pour retirer le bracelet il faut employer un outil spécial et lors d'une tentative pour couper ou enlever le bracelet, l'émetteur commence à émettre des signaux particuliers. Le dispositif de contrôle passif comprend un bracelet porté à la main ou au pied et se trouve associé à des équipements permettant d'interroger le bracelet passif à distance.

Encore un autre exemple intéressant de réduction de deux sous-systèmes hétérogènes : une lampe (émetteur de la lumière) et un abat-jour (réflecteur de la lumière). Aux Etats-Unis, une nouvelle lampe électrique extrêmement économique a fait l'objet d'un brevet (brevet Etats-Unis № 4 017 758, 1978, classe 313-112). La surface intérieure de l'ampoule est couverte d'une couche très mince d'argent intégrée entre deux couches de dioxyde de titane qui laissent passer la lumière visible, mais reflètent les rayons infrarouges. La géométrie de ce miroir transparent (l'ampoule a une forme ellipsoïdale) est telle que les rayons infrarouges se focalisent sur le filament et le chauffe. Ainsi, le même flux de lumière nécessite deux fois moins d'énergie.

L'abat-jour (le sous-système auxiliaire) s'est retrouvé à l'intérieur de la lampe, où il s'est rapproché de l'organe de travail. Dans ce cas, dans les limites de l'ampoule, il n'y a pas d'espace éclairé ; de ce fait, l'organe de travail est le filament et l'objet est la lumière. Le sous-système intégré est disposé dans la couche frontalière de la surface intérieure de l'ampoule. L'efficacité remarquable de cette innovation a même été appréciée par le Ministère de l'industrie électrotechnique d'URSS. A cette occasion, le vice-ministre critiquait ainsi ses propres erreurs (*Inventeur et innovateur*¹⁰⁴, 1980, №8) : "Citons l'exemple d'une ampoule électrique conçue aux Etats-Unis et consommant pour le même flux de lumière deux fois moins d'énergie. Nous avons échoué dans la conception d'une telle ampoule. Toutefois, on aurait pu déterminer, selon les informations des bases de brevets remontant aux 3 ou 4 dernières années, sur quoi portaient des recherches intensives des chercheurs étrangers et prévoir le résultat obtenu. Si cela avait été fait à temps, on aurait pu inclure la conception

¹⁰⁴ *Изобретатель и рационализатор*, 1980, № 8

d'une nouvelle source de lumière dans le plan des travaux de recherche et avoir à présent une ampoule identique".

L'incohérence de cette déclaration est manifeste : si les informations de la base de brevets permettaient de suggérer cette solution bien avant la publication du brevet américain, alors pourquoi n'a-t-elle pas été trouvée en Russie ?

Cette innovation a été réalisée en totale conformité avec une loi de TRIZ. Cette innovation aurait donc dû être réalisée beaucoup plus tôt en Russie que dans les autres pays. De plus, si les spécialistes avaient consulté le fonds d'innovations national (classe N01K), ils auraient découvert que le premier pas dans cette direction avait été fait justement en URSS, dans le brevet № 3 284, 1925, P.V. Bekhtérev : "Lampe électrique à incandescence avec un réflecteur à l'intérieur". Voilà un résumé du raisonnement de l'auteur de cette innovation. Dans les lampes existantes la lumière se diffuse irrationnellement, c'est-à-dire que l'énergie lumineuse émise est mal utilisée. Il est possible de corriger ce défaut dans une grande mesure en utilisant des abat-jour correspondant grâce au phénomène de réflexion de la lumière sur la surface intérieure d'un abat-jour. Cependant, les abat-jour métalliques émaillés ne reflètent que médiocrement la lumière, alors que les abat-jour utilisant des miroirs, à cause, entre autre, du ternissement facile et pour d'autres raisons, ne sont pas assez pratiques. En revanche, à l'intérieur de la lampe il n'y a ni poussières, ni mouches, ni gaz oxydants. L'auteur propose de placer à l'intérieur de l'ampoule différents types de réflecteur : parabolique (un faisceau de lumière en tant que projecteur), convexe, concave, décoratif et même holophane ; ce dernier dans sa coupe transversale représente un prisme holophane – des prismes triangulaires courbes et accolés en verre transparent, de plus leur face tournée vers le filament est lisse et l'autre est nervurée ce qui permet d'obtenir une réflexion intérieure complète.

Autrement dit, une idée progressiste de réunir le réflecteur avec une lampe et de lui donner une forme géométrique précise a été avancée depuis longtemps, dès le début de la période d'utilisation massive de la lampe électrique.

Brevet américain № 2 859 336 (1958) présente une lampe avec un écran thermoréflecteur qui focalise le rayonnement sur un filament en tungstène ; cependant, à la température 2 600 – 3 000 °K le tungstène commençait à s'évaporer et à se déposer sur l'ampoule, ce qui la ternissait.

Le brevet allemand № 2 790 151 (1975) visant à baisser la température d'une spirale en tungstène, propose de placer à l'intérieur de la spirale un matériau qui émet une lumière visible lors de l'échauffement.

Le brevet d'URSS № 202 326 – dans le même but, propose une tige en nitrure d'aluminium, couverte d'une poudre de tungstène.

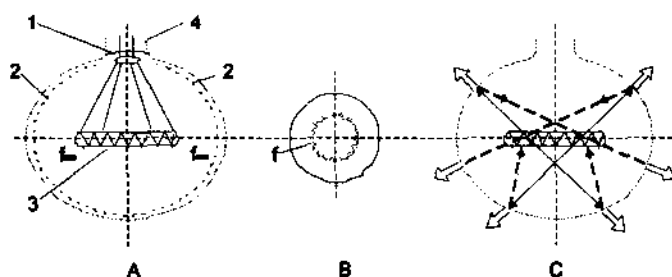
Dans ces innovations, on a essayé d'utiliser l'énergie "nuisible" des rayons infrarouges pour réaliser un échauffement supplémentaire de la spirale ; on a tout de suite rencontré une contrainte liée à la température extrême de tungstène (jusqu'à son évaporation). Ainsi, il est plus avantageux de diminuer la quantité d'énergie requise pour chauffer la spirale, plutôt que d'élever la température du tungstène. Pour cela il est nécessaire d'augmenter le pourcentage du rayonnement initial dans la zone infrarouge et de le baisser en conséquence dans la zone de la lumière visible.

Le brevet français № 2 253 273 (1973) propose le filament incandescent ; il est placé dans la zone de lumière visible à l'intérieur d'une ampoule transparente qui est dotée d'un écran qui réfléchit le rayonnement infrarouge sur le filament incandescent. Dans cette lampe, le filament émet d'abord 5 à 10 % de la lumière visible et 90 à 95 % des rayons infrarouges ; de ce fait, la température monte très vite et la puissance du rayonnement visible augmente.

Dans le brevet américain № 4 017 758, l'ampoule en forme d'ellipsoïde et le filament sont placés dans le même foyer de l'ellipsoïde, c'est-à-dire que la majeure partie de l'énergie calorifique se dissipe.

Dans un autre brevet américain № 4 160 929 (1978), on propose une ampoule sphérique (elle possède une surface plus réduite que celle d'un ellipsoïde et un seul foyer) au centre de laquelle se trouve un filament d'une faible taille. Le filament doit être de faibles dimensions car le centre d'une sphère est un point. Un tel filament limite la puissance de la lampe.

Le brevet № 1 023 451 (1983) propose une lampe électrique à incandescence qui comprend une ampoule d'un matériau optiquement transparent en forme d'un ellipsoïde de révolution, recouverte, sur la surface intérieure, d'une couche qui réfléchit le rayonnement infrarouge et laisse passer le rayonnement visible. Un filament en forme de spirale est disposée à l'intérieur de l'ampoule et un réflecteur de forme identique à la forme de l'ampoule est positionné de sorte que son côté concave est tourné vers le filament. Cette lampe se distingue par le fait que pour accroître le rendement du rayonnement, l'ellipsoïde est engendré par une ellipse tournant autour d'un plus petit axe de symétrie et le filament toroïdal est disposé de façon à englober la ligne circulaire des foyers (fig. 39).



1 – réflecteur, 2 – couche intérieure, 3 – filament, 4 – ampoule.

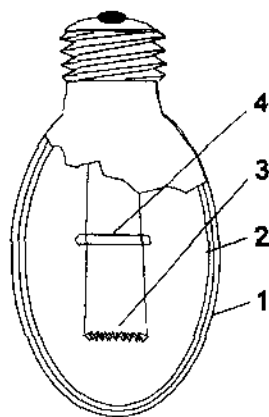
Fig. 39. Une lampe électrique à incandescence selon le brevet № 1 023 451.

Lors de la rotation de l'ellipse, une multitude de foyers, f_1 et f_2 (fig. 39a) forme une ligne circulaire f (fig. 39b). La spirale entoure f .

Lorsqu'on allume la lumière, le filament émet des rayons visibles et invisibles (calorifiques). Les rayons calorifiques sont représentés par un trait continu (fig. 39c), les rayons réfléchis, par un trait pointillé simple. Les rayons visibles qui sortent des limites de l'ampoule sont représentés par un trait double.

Les rayons calorifiques réfléchis retournent au filament par un autre foyer sous forme d'une source supplémentaire d'échauffement. La même dispersion des rayons se reproduit dans n'importe quelle coupe axiale sur toute la longueur de la spirale.

Brevet № 1 083 253 (1984) permet d'accroître le rendement d'une lampe électrique à incandescence et de réduire les exigences envers la précision de sa fabrication ; on place dans son autre foyer un élément avec un coefficient d'absorption du rayonnement infrarouge plus de 0,9 et une température de fusion plus de 2 000 °K (fig. 40).



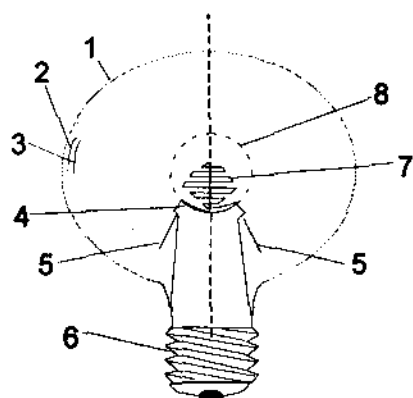
1 – ampoule, 2 – couche intérieure, 3 – filament, 4 – élément destiné à l'absorption dans la zone infrarouge.

Fig. 40. Une lampe électrique à incandescence selon le brevet N° 1 083 253.

Le matériau choisi pour l'élément 4 peut être le siliciure de bore pressé, carbure ou nitrure de silicium dont la température de fusion est d'environ 3 000 °K. Lors de l'échauffement, il émet de la lumière supplémentaire sans énergie supplémentaire.

Dans ce cas, le deuxième filament est diélectrique. On pourrait laisser au filament de tungstène le rôle d'émetteur de l'énergie infrarouge ? Ceci permettrait de répartir les fonctions entre deux substances et d'exclure ainsi le problème d'évaporation de tungstène.

Le brevet N° 1 100 658 (1984) propose une lampe à incandescence dans laquelle le filament est entouré d'un filet qui absorbe le rayonnement infrarouge et émet le rayonnement visible. Le rapport entre le volume du filet et celui de l'ampoule varie de 1 pour 4 à 1 pour 30 ; entre le filament et le filet il varie de 1 pour 3 à 1 pour 10 ; la dimension des mailles du filet est 35 à 80 μm ; le filet est réalisé en oxydes de métaux et possède dans la zone infrarouge une opacité de 0,4 à 1,0.

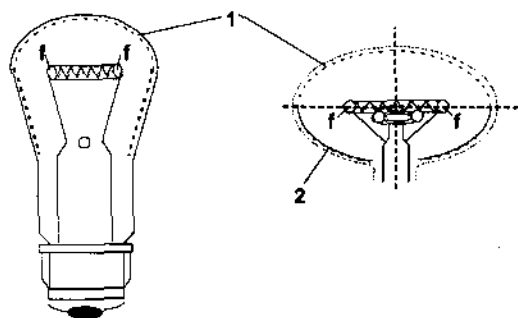


1 – ampoule, 2 – structure irrégulière, 3, 4 – écrans réfléchissant les infrarouges, 5 – conducteurs, 6 – douille, 7 – filament, 8 – filet d'oxyde.

Fig. 41. Une lampe électrique à incandescence selon le brevet N° 1 100 658.

La lampe à incandescence (fig. 41) fonctionne comme suit : le filament chauffé à 2 600 – 3 000 °K émet 4 à 9 % de rayonnement visible et plus de 90 % de rayonnement infrarouge. Le gaz environnant, par exemple le xénon, transmet la chaleur sur le filet 2. Le filet d'oxyde est constitué d'oxydes de zirconium, de thorium ou d'hafnium avec du cérium qui absorbent les infrarouges et émettent le lumière visible. Si les mailles du filet ont moins de 35 μm , on voit accroître le rayonnement ultraviolet ; si elles ont plus de 80 μm , on voit

accroître le rayonnement infrarouge. La couche irrégulière sur la surface interne de l'ampoule est nécessaire pour diffuser la lumière.



1 – couche qui réfléchit le rayonnement infrarouge, 2 – couche miroir.

Fig. 42. Une lampe électrique à incandescence selon le brevet № 1 309 120.

Le brevet № 1 309 120 (1987) propose une lampe à incandescence dans laquelle, pour accroître le rendement, la surface intérieure réfléchissante de l'ampoule est formée par la rotation de deux segments de paraboles dirigés inversement, liés entre eux et possédant un axe et un foyer commun. Le foyer se trouve à l'intersection de l'axe des paraboles avec la ligne circulaire des foyers, sachant que le reste de la surface réfléchissante est couvert d'une couche miroir (fig. 42).

4.11.4.4. Quatrième voie – substitution du ST à une substance idéale

La transformation d'un ST en une substance (le système n'existe pas et une substance remplit sa fonction) ou, ce qui est la même chose, l'idéalisation de la substance jusqu'au niveau d'un système technique (en se compliquant, la substance remplit une quantité de fonctions de plus en plus importante, jusqu'à remplir les fonctions d'un ST entier) peut se dérouler suivant les étapes suivantes :

- *une substance remplit les fonctions de deux ou plusieurs substances ;*
- *une substance universelle remplace quelques sous-systèmes ;*
- *la substance idéale (SI) remplace le ST.*

Les propriétés essentielles d'une SI sont :

- *une FUP très élevée ;*
- *l'auto-organisation ;*
- *l'adaptation à des changements de l'environnement (une action extérieure de contrôle n'est pas indispensable).*

L'évolution prévisionnelle d'un ST (une "idéalisation" orientée de substance) est possible, par exemple, à l'aide d'un *opérateur d'idéalisation* : il exclut progressivement certaines substances du sous-système en transmettant leurs fonctions à une seule substance, puis tout le sous-système se réduit à cette substance.

L'organe de travail, en tant que partie du système qui évolue le plus intensivement, "attire" vers lui des substances et des sous-systèmes voisins plus fort que les autres.

Par exemple dans le système technique "fusil", l'organe de travail est le projectile. Le sous-système le plus proche est le canon. Une des fonctions du canon est remplie par les

rayures (sillons hélicoïdaux réalisés à l'intérieur du canon) qui transmettent au projectile le mouvement de rotation. Comment l'organe de travail, c'est-à-dire le projectile, pourrait remplir cette fonction ? Il existe diverses possibilités, par exemple, utiliser un projectile en forme de turbine, dont les pales sont réalisées en matériau à mémoire de forme. Les pales s'ouvrent sous l'effet de chaleur produite par les gaz de poudre et font tourner le projectile sur lui-même lorsqu'il est tiré du canon. En vol, le projectile se refroidit et les pales se replient.

Une autre fonction du canon consiste à évacuer l'excédent de chaleur. Voici comment on pourrait faire remplir cette fonction à l'organe de travail (le projectile). On réalise le projectile en matériau capillaire-poreux imprégné d'une substance qui s'évapore à une température déterminée. Par ailleurs, les pores peuvent s'ouvrir uniquement du côté extérieur.

5. SCHEMA GENERAL D'EVOLUTION DES ST

L'histoire de l'humanité n'a connu que peu de découvertes et d'innovations qui ont ébranlé les fondements de la population humaine et qui ont donné une puissante impulsion à l'évolution de la civilisation. Parmi ces innovations révolutionnaires on peut citer :

- la découverte de feu,
- l'invention des outils de pierre,
- la formation du langage, de l'écriture, la diffusion de l'imprimerie,
- la découverte de l'électricité,
- les inventions permettant de transmettre l'information sans support,
- la conquête spatiale,
- les technologies de l'information,
- la biotechnologie et l'ingénierie génétique...

Il ne faut pas oublier que tous ces événements nous apparaissent comme de grands bonds d'évolution uniquement dans la perspective historique. En réalité, ils ne sont que le reflet des périodes de croissance plus au moins impétueuse de la FUP dans un domaine donné de l'activité humaine. Durant ces périodes, en vue de résoudre des problèmes essentiels, on a employé des moyens et des forces sociales plus ou moins importants, on a créé des connaissances nécessaires à la résolution de problèmes, on a exploité des découvertes et des innovations faites antérieurement (qui, autrefois, semblaient être inutiles, dues au hasard, en avance sur l'époque). On reconnaît le commencement de ces périodes d'accélération d'évolution (des saccades, des envols de la FUP) à une période précédente, longue ou courte, de ralentissement (ou d'arrêt) dans le développement de la FUP.

A propos, on observe de tels ralentissements de l'évolution dans de nombreux domaines de la technique moderne. En voici quelques-uns¹⁰⁵ :

- les horaires du trafic fluvial sur la Volga n'a pratiquement pas changé entre 1901 et 1987, car la vitesse de circulation avait atteint, dès le début du siècle précédent, la vitesse limite pour ce type de navires ;
- une machine à coudre inventée il y a 150 ans effectuait 300 points par minute ; la productivité des machines modernes atteint 3 000 à 3 500 points par minute à condition que l'on couse des tissus en fibres naturelles ; cela dit, cette vitesse est trop élevée pour coudre des tissus synthétiques, car l'aiguille s'échauffe par frottement et fait fondre les polymères ;
- la vitesse moyenne de découpe de métaux sur un tour est passée en 100 ans de 2,8 m/min. à 115 m/min., néanmoins elle ne croît pratiquement plus depuis 1965 ;
- la vitesse des trains n'augmente plus depuis 1965, la productivité du transport ferroviaire s'est améliorée par une augmentation de la masse et de la longueur des trains ;
- l'accroissement du rendement des générateurs électriques des Centrales thermiques et nucléaires s'est arrêté et a atteint un niveau d'environ 30 % ;

¹⁰⁵ Н.И.Петров. Рубежи внедрения. Серия "Техника", 1989, № 1, с.46-52

- selon les spécialistes, il est impossible et déraisonnable de concevoir des générateurs dont la puissance excède 2,5 à 3.106 kW ;
- les lignes à haute tension approchent également la limite de leurs potentialités, leur tension ne peut excéder 2 200 à 2 500 kV ;
- les propriétés physiques et chimiques des matériaux traditionnels (coton, laine, cuire, métal, alliages, béton armé et autres) ont aussi atteint leur limite ;
- le rendement de diverses cultures et avant tout des céréales est proche de son niveau maximum ;
- la nature impose des restrictions rigoureuses à l'intensification de processus technologiques dans l'élevage ;

etc.

Ces signes de ralentissement et beaucoup d'autres marquent uniquement l'approche d'une période d'évolution accélérée de chacun de ces domaines de l'activité humaine. Des difficultés et des contradictions seront surmontées et une nouvelle technique, de nouvelles méthodes et technologies assureront un grand bond en avant dans la FUP. Chaque augmentation de la FUP peut être atteinte grâce à l'utilisation de connaissances obtenues au cours de l'évolution d'un ST, extraites des réserves de la science ou créées spécialement (réalisation d'un besoin) pour le problème en question. Au cours de temps, l'accroissement de la FUP ralentira et le cycle se reproduira.

Ainsi, nous avons toutes les raisons pour parler d'une évolution ondulatoire de la technique. Il est possible également de supposer une certaine symétrie dans le cadre d'une vague : une partie de lois d'évolution de la technique sont inverses (elles se convertissent en leur opposé) à différentes périodes de croissance et de décroissance (fig. 43).

Si c'est le cas, alors le problème, sujet de nombreuses discussions dans TRIZ, de "collision des lois" (l'augmentation de la FUP dans des systèmes techniques s'obtient tantôt par dynamisation, tantôt par anti-dynamisation, par la transition au micro-niveau ou bien par le retour au macro-niveau, etc.) ne se pose plus. L'application de telles ou telles lois dépend de la période d'évolution dans laquelle se trouve le système (croissance, décroissance). En outre, des niveaux différents d'un système (substance – sous-système – systèmes technique – super-système) peuvent traverser simultanément des périodes d'évolution différentes.

Le modèle ondulatoire d'évolution de la technique (élaboré en 1984 sur un exemple d'utilisation des processus d'un ST "Caloduc") a trouvé sa confirmation, contre toute attente de ses auteurs, dans des ouvrages des économistes. Il s'est avéré qu'un modèle similaire a été proposé en 1925 par N.D. Kondratiev¹⁰⁶ et largement adapté à l'étranger (ce modèle a été développé à partir des années 20 par des savants renommés tels qu'un Autrichien J.A. Schumpeter, un Américain J.W. Forrester et d'autres). L'auteur de la "*théorie de grands cycles*" de l'économie a été reconnu dans le monde entier comme un savant illustre, sa renommée est confirmée par d'innombrables références à ses ouvrages, par ailleurs, les cycles mêmes s'appellent depuis longtemps "*cycles de Kondratiev*".

¹⁰⁶ *Большие циклы конъюнктуры*. "Вопросы конъюнктуры", 1925, № 1

Note bibliographique

Nikolaï Dmitriévitch Kondratiev, né en 1892, a brillamment terminé l'école de l'église paroissiale¹⁰⁷ et l'école pédagogique paroissiale¹⁰⁸, puis l'école d'agriculture et la faculté juridique de l'Université de St Pétersbourg. Il s'est passionné pour l'économie. A 25 ans, il a été nommé sous-ministre de l'alimentation dans le dernier gouvernement provisoire. Il fut membre du Parti socialiste-révolutionnaire. En 1920, Kondratiev crée un Institut de la conjoncture et en devient son directeur. L'objectif de l'Institut consiste à traiter un large cercle de problèmes relatifs à la théorie et la pratique économique. Les travaux réalisés à l'Institut l'ont amené à la découverte des grands cycles. Le premier discours public sur ce sujet a été tenu en 1922. Kondratiev a publié plus de cent ouvrages avant 1930. Il se prononçait contre la politique rigide de l'industrialisation et de la collectivisation. Après son arrestation en 1930, la Cour l'a condamné, en 1931, en audience publique, à 8 ans de détention. En 1938, peu de temps avant sa sortie de prison le deuxième jugement l'a condamné à être fusillé.

D'après la théorie de Kondratiev, les variations dans la croissance économique, dans l'activité créative et innovante, dans le développement technique à partir de la première révolution industrielle et jusqu'à nos jours, correspondent à quelques grandes vagues, ou cycles.

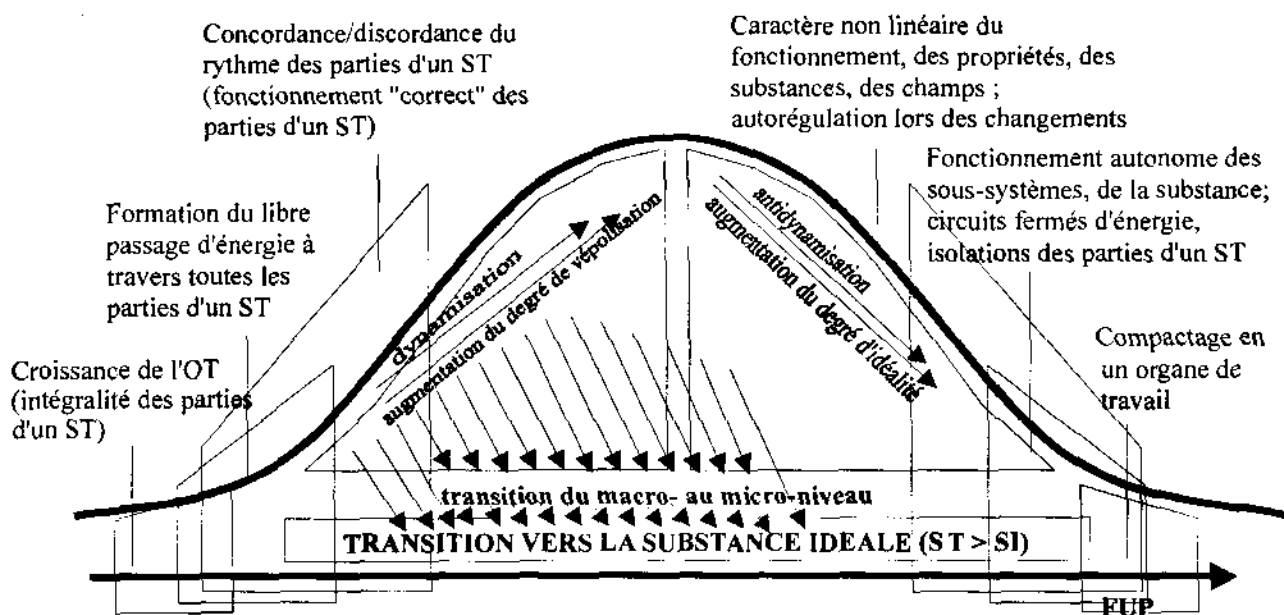


Fig. 43. Schéma général d'évolution des ST

Chaque vague, ou cycle, de Kondratiev est constituée de quatre phases – *reconstruction, prospérité, ralentissement et dépression* – qui couvrent tous les paramètres du développement technique, notamment génération d'idées, activité entreprenante, qualification de spécialistes, etc. Ces derniers temps on attribue également à ces paramètres des facteurs psychologiques (changements des orientations psychologiques, des repères de valeur, de la motivation).

¹⁰⁷ [NDT] : Etablissement scolaire en Russie au XIX^e siècle destiné aux couches les plus modestes de la société (cycle d'étude de deux ans).

¹⁰⁸ [NDT] : Etablissement scolaire pour la formation des maîtres d'école (XIX^e siècle).

La "Grande dépression" des années 1929-1933 a coïncidé avec une ligne descendante de la troisième vague – Kondratiev a prédit cette récession économique.

Quatre cycles de Kondratiev

Cycles	I	II	III	IV
Révolution industrielle	1775-1785			
Prospérité	1785-1815	1860-1873	1905-1920	1948-1970
Ralentissement	1815-1825	1873-1886	1920-1929	1970-1980
Dépression	1825-1840	1886-1896	1929-1937	1980-2000
Durée	65 ans	36 ans	32 ans	52 ans
Reconstruction (début du prochain cycle)	1840-1860	1896-1905	1937-1948	2000-...

Remarque : la dernière colonne de dates coïncide (peut-être, par hasard) avec l'histoire de naissance et de développement de TRIZ.

A la base du premier cycle du développement se trouvaient des innovations telles que la machine à vapeur et le métier à tisser. A la base du deuxième cycle, figuraient la métallurgie et le transport ferroviaire, à celle du troisième cycle – la chimie, l'électricité et le transport automobile. La base technologique du quatrième cycle : l'électronique, la chimie pétrolière, la construction aéronautique. Selon un savant japonais Hattori Tossio, à la base du cinquième cycle seront la céramique, les semi-conducteurs, la technologie laser, l'information et la communication, des recherches spatiales. A notre avis, le cinquième cycle se basera sur la biotechnologie, l'intelligence artificielle, la nanotechnologie, l'industrie spatiale.

La montée de la vague débute par une ou plusieurs innovations qui apparaissent encore pendant la période de la vague précédente – généralement durant le stade de son ralentissement, de sa dépression. L'innovation se heurte à une forte réaction. Cette résistance acharnée à sa mise en œuvre s'explique par des raisons "objectives" : l'insuffisance des moyens, son utilité douteuse pour les besoins du moment. Souvent, l'innovation est pénalisée, dans un premier temps, par une faible rentabilité économique et occasionne la remise en cause des structures traditionnelles. Cependant, *plus la résistance est forte, plus d'énergie potentielle s'accumule pour préparer l'essor ultérieur.*

Au début, l'innovation est mise en pratique dans une seule branche de l'industrie ; là, commencent sa production de masse et, de ce fait, la période d'utilisation de masse. Par ailleurs, les besoins accrus engendrent des prétentions envers l'innovation, des exigences d'augmenter sa FUP. La branche d'industrie se réorganise et se transforme en une industrie clé, elle exige davantage des industries contiguës et des fournisseurs qui, à leur tour, ont des exigences élevées envers les chaînons suivants.

K.B. De Grinet note que le stade de génération de connaissances (d'innovations) et son application pratique sont séparés par un laps de temps qui varie de quelques années à quelques décennies. Selon lui, les pics de naissance des innovations les plus fortes coïncident avec 1825, 1886 et 1935, c'est-à-dire avec les années de dépression. C'est le moment où l'on se rend à l'évidence que de vieilles idées et méthodes sont épuisées et qu'il n'y a pas d'autre choix que de chercher de nouvelles solutions et approches. De nouvelles idées et approches proposent aux hommes de nouveaux objectifs et leur donnent un espoir, font disparaître l'inquiétude et le sentiment de menace ; l'approche créative devient prédominante. C'est à ce moment-là que le développement de la science et de l'activité innovante a besoin d'une base d'objectifs dignes (BOD).

V. Zoubtchaninov et N. Soloviev¹⁰⁹, après avoir analysé les brevets américains des années 1840-1984, ont déduit que le pic d'activité débordante dans ce domaine était en 1880, en 1930, en 1970. Chaque pic correspond au début d'une longue récession économique. Des courbes enregistrées démontrent l'absence de relation entre les variations dans la quantité de brevets et les circonstances extrêmes telles que guerres et crises cycliques. En gros, les changements de quantité de brevets correspondent aux montées et aux chutes de grandes vagues de N.D. Kondratiev.

Ils ont également effectué une analyse complète des brevets américains dans 13 branches traditionnelles et 24 branches nouvelles de l'activité scientifique et productive pendant la période de 1947 à 1986. Ils ont noté que dans le groupe de la technique principalement nouvelle on voit d'abord apparaître des innovations d'infrastructure. Quand leur quantité atteint le maximum, commence la période de leur perfectionnement, on voit naître un grand nombre d'innovations ordinaires. Ensuite, la vague est maintenue encore une décennie par des innovations dans le domaine de la technique traditionnelle qui domine toujours la technique nouvelle. Pour certains domaines de la technique au sein des grandes vagues existent des vagues plus courtes, par exemple dans la quatrième grande vague : alliage ionique de semi-conducteurs, spectrométrie de masse, utilisation d'ondes radioélectriques réfléchies pour déterminer des distances, etc. La position de points maximums (minimums) des vagues pour ces types de la technique coïncident souvent, c'est-à-dire le phénomène porte le caractère "de groupe". Après avoir analysé la question essentielle, notamment la cause première de l'apparition de grandes vagues, les auteurs aboutissent aux conclusions suivantes :

- la cause première du phénomène de grandes vagues dans l'économie repose sur les lois d'innovations d'infrastructure (et non sur la dynamique d'investissements selon la théorie de J.W. Forrester) ;
- une autre cause des grandes vagues est l'épuisement de la réserve d'innovations basées sur les mêmes principes physiques de fonctionnement ; on élabore davantage de nouvelles idées et de nouveaux principes dont la mise en œuvre apporte au consommateur des effets technique et économique considérables (dans notre terminologie – croissance de la FUP).

Si l'on analyse ces conclusions en tenant compte des idées exposées dans cet ouvrage, on verra que, dans le contexte précis de l'évolution des systèmes techniques, la cause première est dissimulée plus profondément, notamment dans la croissance de la FUP, dans les besoins de la société, dans l'interaction de la société et de la technique, dans le développement relativement autonome des systèmes techniques suivant les vagues d'idéalisation. Certaines propriétés fondamentales du monde matériel et de la conscience individuelle et sociale déterminent le caractère ondulatoire de leur interaction.

Encore le génie K.E. Tsiolkovski¹¹⁰ le ressentait :

"... Auparavant nous enseignions la réitération des phénomènes ou la périodicité des univers, leur mainte destruction et naissance. C'est vrai, mais les périodes ne sont pas absolument identiques, elles semblent descendre quelque part ou donner une matière de plus en plus complexe. On pourrait comparer ce phénomène à une route ondulée : nous montons et descendons sans nous apercevoir que la route en général est

¹⁰⁹ В.Зубчанinov, Н.Соловьев. *Изобретения и длинные волны*. "Мировая экономика и международные отношения", 1989, № 6, с.125-132

¹¹⁰ [NDT] : Physicien russe (1857-1935), universellement considéré comme le précurseur de l'ère spatiale [cf. *TSIOLKOVSKI*. Annexes. Explications].

inclinée, autrement dit, avec la disparition de chaque période nous nous situons plus bas qu'avant. Bien sûr, les périodes (les vagues) et la descente (complication et compactage de la matière) sont infinies."

ANNEXES

ABREVIATIONS

ARIZ – Algorithme de la Résolution des Problèmes Inventifs

BOD – base d'objectifs dignes

C – champ

CP – contradiction physique

CT – contradiction technique

E – énergie

EP – effets physiques

FUP – fonction utile principale

MCP – matériau capillairo-poreux

MDE – Masse, Dimensions, Energie

Mt – moteur

NDT – note de traducteur

OC – organe de commande

OT – organe de travail

RSC – ressources de substance et de champ

S – substance

SE – source d'énergie

SI – substance idéale

ST – système technique

Tr – transmission

TRIZ – Théorie de la Résolution des Problèmes Inventifs

TRTS – Théorie d'Evolution des Systèmes Techniques

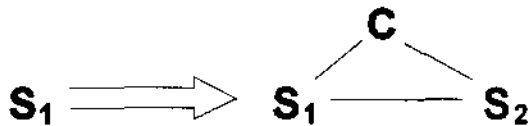
EXPLICATIONS

Problème de mesurage de la hauteur d'une grotte

Problème de mesurage de la hauteur d'une grotte

Comment mesurer une grotte si haute que la lumière d'une torche électrique n'atteint pas sa voûte, sachant qu'il est impossible d'escalader ses murs ? Il faut trouver un moyen simple de résoudre le problème. Par ailleurs, le poids du "dispositif" doit tendre vers zéro (les spéléologues, tout comme les alpinistes, n'aiment pas le poids superflu).

Le vépole est le modèle d'un système technique minimal contrôlable et fonctionnel. La notion de vépole nous indique la voie à suivre pour résoudre ce problème. Dans notre cas, S1 est la voûte de la grotte, c'est-à-dire un élément du vépole. Par conséquent, il est nécessaire de compléter le système jusqu'à l'obtention d'un vépole complet. Voici la formule d'une telle transformation :



Ce vépole est présenté sous sa forme générale (il ne comporte pas de flèches), donc, nous ne connaissons pas la nature de l'interaction entre les éléments. Cependant, nous savons à présent ce qui manque à ce système : une substance et un champ. Ce couple (S_2 et C) est l'instrument de mesure recherché. Toutefois, les conditions du problème comportent une forte restriction : le poids du dispositif doit être quasiment inexistant. Intensifions la contradiction comme suit : le dispositif existe mais ne pèse rien ! Notons que la méthode d'intensification des contradictions aide très souvent à résoudre les problèmes plus rapidement et, paradoxalement, plus la contradiction est forte (impossible), plus elle est simple à résoudre. Essayons d'intensifier davantage notre contradiction : le dispositif existe, mais il n'a pas de poids (une contradiction technique déroutante, une sorte d'antigravitation !). N'oublions pas que tout est réalisable. Pour que le poids du dispositif soit égal à zéro, il doit être compensé par quelque chose, par une force ascensionnelle par exemple. C'est à ce moment-là que l'idée de la réponse nous traverse l'esprit : utiliser un ballon avec une ficelle ! L'essence de l'idée de non-poids paraît moins effrayante, car la force ascensionnelle d'un ballon peut être beaucoup plus importante que le poids d'une bobine de fil.

Problème de contrôle de l'intégrité d'une dent de foreuse

Lors du forage de puits profonds, il est indispensable de connaître précisément l'état des dents de la foreuse. Sans le savoir, le travail se poursuit à l'aveuglette, c'est-à-dire que de temps à autre on remplace l'instrument par un neuf au hasard. Pour effectuer cette opération, il faut extraire du puits toute la colonne de tuyaux mesurant parfois quelques kilomètres. Inutile de dire que c'est une opération extrêmement longue et complexe ! Il nous faut une idée d'un moyen simple de contrôler l'état de l'instrument.

Diverses voies de résolution ont été proposées : une dizaine de voies ordinaires (faire des dents incassables, autoremplaçables, concevoir un appareil de démontage rapide des tuyaux, introduire un système de capteurs électroniques, etc.) et quelques voies "absurdes" (demander conseil à un parfumeur, étudier le système de distribution de gaz naturel, consulter le domaine de la chimie relatif aux éthers complexes). Les résultats des expériences mentales se ressemblaient toutes : des idées "absurdes" ou saugrenues étaient rejetées tout de suite, ensuite, on discutait de l'automatique, de microprocesseurs et de microrobots se promenant à l'intérieur des tuyaux.

Pourtant, seules les idées "absurdes" étaient susceptibles de générer une réponse correcte. Ainsi, le brevet russe № 163 559 propose d'intégrer dans les dents de la foreuse des micro-ampoules remplies de substances odorantes (parfums, éthers complexes) ou malodorantes (en ajoutant dans le gaz naturel du méthylmercaptan, une substance ayant une odeur repoussante déjà lorsque sa concentration est de l'ordre de $1 \text{ mg}/10\,000 \text{ m}^3$ d'air !).

Effet électrohydraulique de Yutkin

Il est possible de produire une onde de compression dans un liquide au moyen d'une forte décharge électrique générée par un système d'électrodes immergés dans l'eau (effet électrohydraulique de Yutkin). Plus la tension de l'impulsion électrique est élevée et moins le liquide est compressible, plus forte est la pression du choc et plus le choc électrohydraulique est éclatant. Cette technique est utilisée dans le traitement à froid des métaux, lors de la destruction des roches, pour intensifier des réactions chimiques, etc.

TSIOLKOVSKI (K.E.)¹¹¹

TSIOLKOVSKI KONSTANTIN EDOUARDOVITCH (1857-1935)

Physicien russe, né à Ijevsk (district de Kazan) et mort à Kalouga, Tsiolkovski est universellement considéré comme le précurseur de l'ère spatiale. Autodidacte, en raison d'une surdité qui l'empêche de fréquenter l'école, il acquiert, par la lecture, de vastes connaissances en mathématiques, en physique et en technologie. Tout en gagnant sa vie comme instituteur, il consacre ses heures de liberté à l'étude de la locomotion aérienne et publie en 1887 une étude théorique sur la possibilité de construire un ballon dirigeable entièrement métallique. Trois ans plus tard, il soumet à la Société impériale des ingénieurs un important mémoire sur l'aérodynamique des planeurs. Ces travaux devaient le conduire à aborder l'étude des fusées, puis celle de l'exploration spatiale dont il devient, vingt ans avant Robert Hutchings Goddard et Hermann Oberth, le premier théoricien.

En 1898, il propose l'utilisation de propergols liquides pour la propulsion des fusées et démontre les avantages que ceux-ci possèdent sur les carburants solides. Il recommande, en particulier, la combinaison de l'hydrogène liquide et de l'oxygène liquide, combinaison qui devait être adoptée quelque soixante-dix ans plus tard. En 1903, il écrit le plus célèbre de ses articles : "Exploration de l'espace au moyen d'engins à réaction", dans lequel il expose le principe de la propulsion par réaction, démontre que ce procédé peut fonctionner dans le vide et donne la formule mathématique permettant de calculer la vitesse atteinte par une fusée à la fin de la phase de propulsion en fonction de la vitesse d'éjection des gaz ; cette formule est à la base de toutes les réalisations ultérieures en astronautique.

Malheureusement, les travaux de Tsiolkovski se heurtent à une totale indifférence. À tel point que l'article qu'il soumet, en 1903, à L'Observateur scientifique de Moscou ne sera publié qu'en 1923, après la révolution. Le nouveau régime encourage Tsiolkovski à poursuivre ses recherches et celui-ci à la satisfaction de voir enfin reconnue l'importance de ses travaux. Ses idées ont essaimé et, dès 1929, un groupe de jeunes techniciens, passionnés par ses théories, crée à Leningrad un organisme consacré au développement des moteurs-fusées qui va bientôt devenir la pépinière des futurs ingénieurs soviétiques de l'espace.

Parmi les idées dont l'astronautique est redevable à Tsiolkovski, on peut citer, outre l'utilisation des propergols liquides, l'emploi des tuyères convergentes-

¹¹¹ © 1999 Encyclopædia Universalis France S.A. Tous droits de propriété intellectuelle et industrielle réservés.

divergentes, le refroidissement des parois de tuyères par circulation des ergols, le principe des fusées à étages, la création d'une gravité artificielle par la mise en rotation du vaisseau spatial, le recyclage en circuit fermé des produits du métabolisme des occupants d'un astronef.

Outre la douzaine d'ouvrages techniques écrits entre 1883 et 1935, Tsiolkovski a laissé deux livres de science-fiction, *Fantaisies de la Terre et du Ciel* (1895) et *Au-delà de la Terre* (1920).

LISTE DE FIGURES

Fig. 1. Schéma d'évolution des outils de production.....	8
Fig. 2. Évolution des moyens d'écriture	13
Fig. 3. Pompe à vapeur destinée à élever l'eau de Thomas Savery.....	26
Fig. 4. Pompe à feu de Newcomen	26
Fig. 5. Machine à vapeur universelle de Polzounov	27
Fig. 6. Schéma de la soufflerie de Polzounov.....	28
Fig. 7. Schéma de la machine à vapeur de J. Watt.....	29
Fig. 8. Procédé de préparation des pommes de terre, de légumes et de fruits à un traitement thermique (Brevet № 1 132 905)	45
Semoir romain (III ^e siècle av. J.-C.), Musée des techniques et métiers de Calcutta.....	58
Schéma structurel d'un ST "fusil" : ses principales parties.....	61
Structure hiérarchique d'un ST "fusil" :	61
Fig. 9. Système technique "seringue"	62
Fig. 10. Principe de fonctionnement d'une machine-outil destinée au polissage par ultrasons en régime d'auto-résonance	76
Fig. 11. Roue d'un avion selon le brevet français № 2 600 619.	78
Fig. 12. Hache selon la demande de brevet international 88/00 112	78
Fig. 13. Élément élastique selon le brevet № 1 015 150.....	80
Fig. 14. Amortisseur selon le brevet № 1 392 279.	82
Fig. 15. Patte d'attache selon le brevet № 895 886.	83
Fig. 16. Amortisseurs d'oscillations.	84
Trains silencieux	85
Fig. 17. Procédé d'étirage de métal selon le brevet № 1 002 064	87
Enfoncement par un sac de sable	96
Fig. 17-1. Procédé 901 377	97
Fig. 18. Procédé d'extraction d'une douille d'emmanchement montée à force.....	102

Fig. 19. Procédé d'obtention de haute pression selon brevet № 566 656.	103
Fig. 20. L'accouplement démontable selon le brevet № 1 298 439.	103
Elimination progressive de la désorganisation.	107
Augmentation du degré de segmentation de la substance.	109
Fig. 21. Conception d'un miroir pour un laser puissant.	115
Procédés de traitement de matériaux	118
Fig. 22. Un des mécanismes de la transition vers le super-système – transition "mono-bi-poly".	120
Fig. 23. Schéma d'une perceuse automatique.	122
Fig. 24. Un tire-ligne selon le brevet № 1 266 755.	125
Fig. 25. "Bi-système" passoire.	126
Fig. 26. Le ressort selon le brevet № 1 190 110.	127
Fig. 27. Eléments de focalisation.	129
Fig. 28. Types d'idéalisation des systèmes.	131
(Où F_n est la fonction du système ou la "somme" de quelques fonctions.)	131
Fig. 29. Un des types mixtes d'idéalisation des systèmes réels.	132
Fig. 30. Idéalisation normale des systèmes réels	132
Fig. 31. Evolution des ST dans le temps.	133
Fig. 32. Modèle d'évolution des ST dans l'espace et dans le temps.	133
Fig. 33. Modèle d'évolution des systèmes techniques	134
Fig. 34. Croissance de la vitesse de calcul des calculateurs électroniques de différents types.	138
Fig. 35. Principe d'auto-affûtage des dents et des griffes est à la base des ciseaux multicouches d'A.M. Ignatiev.	141
Fig. 36. Schéma d'un phare avec un "échelon prismatique" selon le brevet № 520 487.	142
Fig. 37. Le procédé d'utilisation d'un liquide transparent en focalisant la lumière sur le récipient (demande de brevet France № 2 595 659).	142
Fig. 38 Voies éventuelles d'idéalisation des ST.	145
Fig. 39. Une lampe électrique à incandescence selon le brevet № 1 023 451.	157
Fig. 40. Une lampe électrique à incandescence selon le brevet № 1 083 253.	158
Fig. 41. Une lampe électrique à incandescence selon le brevet № 1 100 658.	158
Fig. 42. Une lampe électrique à incandescence selon le brevet № 1 309 120.	159
Fig. 43. Schéma général d'évolution des ST	163