

Centenaire de la naissance de l'Humaniste alsacien

Alfred KASTLER

(1902-1984)

Prix Nobel de Physique

Aspects de son œuvre

Guy PERNY

L'auteur se propose de résumer l'essentiel de l'œuvre d'un maître éminent de l'Université de France, né voici tout juste cent ans.

Alfred Kastler, né le 3 mai 1902 à Guebwiller, est le successeur incontesté de plusieurs savants prestigieux à commencer par l'illustre physicien anglais Isaac Newton qui fut le premier à proposer en 1675 une théorie corpusculaire de la lumière assortie de considérations ondulatoires qu'il avait déduites de ses travaux sur les couches minces.

Bien plus tard, vers 1900, le physicien allemand Max Planck énonça l'hypothèse selon laquelle l'énergie ne pouvait être absorbée ou émise que par quantités finies qu'il appelait *quanta*.

Sur ces bases le physicien Louis de Broglie, un collègue contemporain d'Alfred Kastler, effectua en 1924 la synthèse entre les aspects corpusculaires et ondulatoires de la lumière par une théorie cohérente du rayonnement basée sur l'analogie de certains principes de la mécanique classique et de l'optique.

Il montra qu'à toute particule en mouvement est associée une *onde de probabilité* dont la longueur λ (figure 1) est égale à une constante "h" dite "de Planck", divisée par la quantité de mouvement de la particule, c'est à dire par le produit de sa masse par sa vitesse :

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$$h = 6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ joule.seconde} \quad \lambda = \text{lambda}$$

(le joule est le travail produit par une force qui communique à un corps de masse 1 kg une accélération de 1 mètre par seconde au carré).

Ces recherches, ajoutées à celles de l'anglais Maxwell, du hollandais Lorentz et de l'illustre Albert Einstein, sont à la base de l'œuvre d'Alfred Kastler à propos de laquelle nous rappelons d'abord quelques données fondamentales de la physique.

Les travaux qu'il avait entrepris et dirigés étaient dans leur ensemble consacrés aux interactions entre la matière et le rayonnement par la mise en œuvre simultanée de deux disciplines : la *spectroscopie optique* concernant le domaine de la lumière visible et la *spectroscopie hertzienne* qui s'occupe des radiofréquences.

La jonction de ces deux champs de fréquence était en effet devenue possible grâce à la mise au point d'une technique expérimentale assurant la liaison entre le domaine du rayonnement infrarouge et celui des ondes radar.

Alfred Kastler avait par conséquent *deux concepts* à sa disposition, la *matière* et les *ondes*, que nous examinons maintenant, l'un après l'autre.

Amplitude

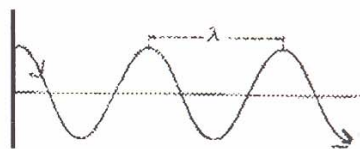


Figure 1

Notion de longueur d'onde

1	2	Tableau périodique des éléments										3	4	5	6	7	0
1 H																2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
			90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

Figure 2  : Radioéléments "naturels"  : Radioéléments "artificiels"

tron*, tous les éléments sont composés d'électrons de charge électrique négative, tournant autour de noyaux composés de protons positifs et de neutrons neutres.

Telles sont les trois sortes de *particules primaires* à partir desquelles se construisent tous les atomes qui peuvent être neutres, excités ou ionisés ; les atomes peuvent s'associer pour former des molécules.

Dans cet exposé on ne parlera pas des *quarks* qui n'apparaissent pas de manière explicite dans les travaux d'Alfred Kastler.

Les comportements de ces particules sont décrits par l'interprétation que l'on donne à un certain nombre de paramètres tels que la masse propre au repos, la durée de vie, le spin, le moment cinétique, le moment magnétique, la parité qui concerne à la fois la matière et l'anti-matière, le charme, l'étrangeté et d'autres qualifications scientifiques.

On peut dire que toute entité matérielle de l'univers est identifiée par une *fiche signalétique* parfaitement connue des spécialistes dont Alfred Kastler fut l'un des plus grands.

Quant aux ondes, celles-ci définissent le processus de propagation des variations subies par une grandeur, à la fois dans l'espace et au cours du temps. Les vagues portées par les flots en sont des exemples.

La résolution des problèmes posés par les phénomènes ondulatoires est basée sur les célèbres équations de Maxwell qui gouvernent l'électromagnétisme.

Il existe plusieurs sortes d'ondes : elles peuvent être balistiques, de gravitation, élastiques, acoustiques, excitoniques, électromagnétiques.

C'est aux *ondes électromagnétiques* qu'Alfred Kastler et ses collaborateurs s'intéressaient ; celles-ci se propagent dans le vide à la vitesse de 300.000 km/sec. Elles sont engendrées par des particules matériellement inexistantes qu'on appelle des *photons*, dont la masse au repos est nulle, mais qui possèdent une *masse relativiste* lorsqu'elles se propagent à la vitesse de la lumière ; cette propagation implique l'existence d'une énergie.

Puisque le *photon* est le "quantum" du champ électromagnétique, la lumière peut être considérée comme un faisceau de photons, autrement dit comme un *paquet d'énergie lumineuse*.

La théorie quantique mise au point par Max Planck et Louis de Broglie, a enfin démontré que les interactions matière-rayonnement, chères à Alfred Kastler et à ses collaborateurs, se faisaient obligatoirement par

* L'hydrogène a deux isotopes : le deutérium et tritium obtenus par *capture* de neutrons extérieurs

D'abord la matière !

Celle-ci est composée des 92 éléments figurant au tableau de Mendeleiev auxquels s'ajoutent une douzaine d'éléments artificiels. L'élément 87 a d'ailleurs été découvert à l'Université de Strasbourg en 1939 par Marguerite Perey, Professeur de chimie nucléaire à la Faculté des Sciences et directeur au C.N.R.S. pour cette discipline (figure 2).

A part l'hydrogène H (1) qui n'a pas de neu-

des sauts quantiques qui se manifestent dans l'atome par les valeurs d'une suite discontinue et croissante de niveaux d'énergie E_i qui permettent l'absorption ou l'émission de photons dont la fréquence est donnée par la relation (figure 3) :

$$E_i - E_j = h\nu_{ij}$$

où

$$\nu_{ij} = \frac{c}{\lambda_{ij}}$$

$$\nu = nu$$

c = célérité de la lumière

λ_{ij} = longueur d'onde

La mise en commun de cette relation avec celle d'Einstein :

$$E = mc^2$$

m = masse relativiste de la particule $= \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

v = vitesse de la particule

permet d'évaluer l'énergie de masse au repos du photon à :

$$m_0 c^2 < 10^{-33} \text{ MeV}$$

< inférieur à

1eV (électron-volt) = $1,6 \cdot 10^{-19}$ joules

1 J = 0,1 kgm

1 MeV = 1 million d'eV

Pour comprendre la portée des recherches d'Alfred Kastler et de ses collaborateurs il est tout à fait indispensable de connaître la structure des ondes électromagnétiques.

Ce sont des ondes sinusoïdales transversales et représentatives d'un champ électrique $\vec{E}$ et d'un champ magnétique $\vec{H}$ dont les amplitudes respectives se conservent.

Ces champs sont figurés par des vecteurs perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la direction de propagation $\vec{P}$ (figure 4).

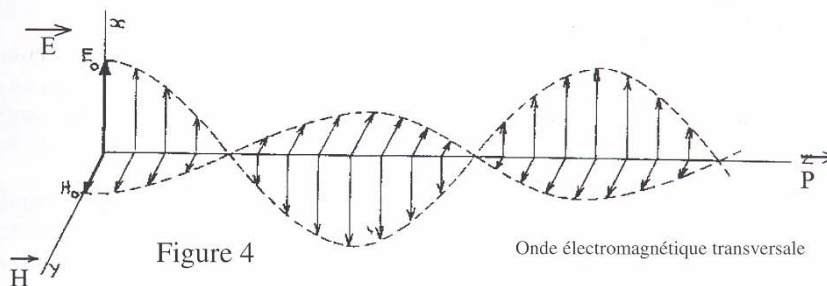


Figure 4

Onde électromagnétique transversale

Energies croissantes

Niveaux excités

E_j

E_i

E_0

0

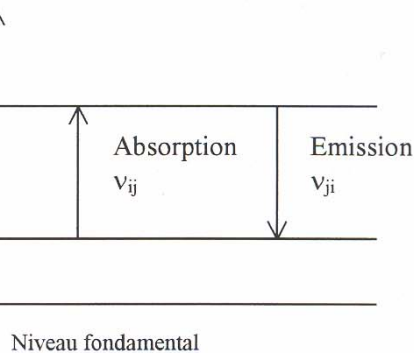
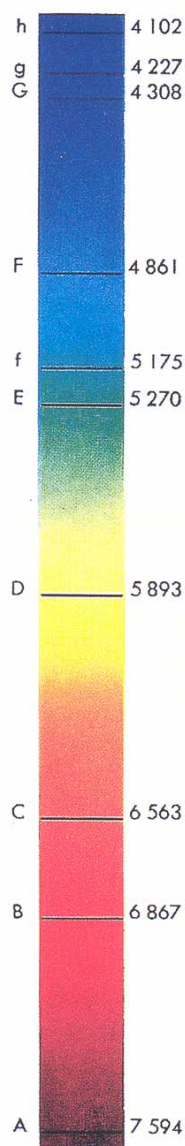


Figure 3

La notion de transition optique



Spectre solaire avec des raies d'absorption (λ en Å)

D'après : FLEURY-MATHIEU, *Lumière*, Eyrolles, Paris (1961)

Figure 5

Ils forment ainsi un trièdre direct dont l'expression vectorielle est :

$$\vec{E} \wedge \vec{H} = \vec{P}$$

A produit vectoriel

L'expérience montre que c'est le vecteur *champ électrique* $\vec{E}$ qui est le vecteur lumière.

Les rayons de lumière sont par conséquent les trajectoires rectilignes des photons.

Mais la lumière naturelle est composée d'une infinité de vecteurs électriques vibrant dans tous les sens dans le plan transversal. Par des systèmes de guidage très simples appelés *polariseurs*, on arrive à forcer tous les vecteurs champ électrique $\vec{E}$ à vibrer dans un même plan. On obtient ainsi de la lumière polarisée rectilignement.

Les physiciens connaissent aussi d'autres formes de polarisation telles que la polarisation électrique, la polarisation magnétique, la polarisation rotatoire magnétique gauche et droite, ces grandeurs étant représentées selon le cas par des vecteurs polaires à symétrie conique ou des vecteurs axiaux à symétrie cylindrique.

Dans le spectre électromagnétique qui nous intéresse les longueurs d'onde de la *lumière visible* se placent entre les rayons X et les rayons infrarouges en passant par la séquence violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge ; les longueurs d'ondes visibles vont de 4000 Å à 8000 Å environ (figure 5).

1 angström = Å = 10^{-8} cm

Ces sont les couleurs de l'arc en ciel.

C'est Newton qui, le premier, avait montré que la lumière blanche était composée d'une multitude de radiations chromatiques, en la décomposant par un prisme.

On découvrira plus tard que le fond continu de la lumière du soleil était strié de *raies sombres* et de *raies brillantes* ; les premières sont des raies d'absorption et les autres des raies d'émission (figure 5).

Toutes ces raies correspondent à des sauts quantiques entre niveaux d'énergie dans les atomes, on les appelle "transitions" ; celles-ci sont gouvernées par des règles de sélection permettant de distinguer les transitions permises de celles qui sont interdites par la mécanique quantique.

Pour ce qui concerne le *modèle vectoriel de l'atome*, ces règles sont simples et ne font intervenir qu'un nombre restreint de nombres quantiques : le nombre quantique principal "n" qui définit le niveau d'énergie, le nombre quantique orbital ou azimutal "l" qui décrit le mouvement, le nombre quantique magnétique "m", le nombre quantique de spin "s" et le nombre quantique interne "j = l ± s".

Les spectres d'émission et d'absorption dépendent bien entendu de la nature des atomes qui les engendrent.

Toutes les grandeurs qui viennent d'être énumérées faisaient partie des centres d'intérêt d'Alfred Kastler dont la carrière peut se partager en deux périodes, selon sa propre déclaration. La première est relative à ses travaux antérieurs à 1950, la seconde se rapporte à l'activité qu'il déploya à l'Ecole Normale Supérieure de Paris avec la collaboration de Jean Brossel.

La *première période* recouvre son travail de thèse sur la polarisation de la lumière de fluorescence de l'atome de mercure Hg (80) et sa découverte des relations existant entre les caractères de *polarisation* des radiations excitatrices et émises d'une part, et l'*orientation spatiale des moments cinétiques et des moments magnétiques des atomes de mercure* de l'autre.

Les moments sont des grandeurs scalaires* ou vectorielles** faisant intervenir des rotations par rapport à un point ou un axe de référence ; ce sont des grandeurs physiques multipliées par une longueur.

Les résultats nouveaux obtenus à ce propos furent repris et poursuivis par des chercheurs de l'Ecole Normale Supérieure de Paris.

Entre-temps Alfred Kastler étudia aussi les phénomènes de diffusion de la lumière par les molécules ainsi que la présence de la *raie de résonance du sodium Na* (11) dans la lumière crépusculaire.

Il fit aussi construire deux photomètres dont l'un était basé sur l'*effet Zeeman* relatif à la décomposition des raies du doublet $D_1 = 5890 \text{ \AA}$ et $D_2 = 5896 \text{ \AA}$ du sodium en plusieurs *composantes polarisées* circulairement ou rectilignement sous l'action d'un champ intense d'induction magnétique $\vec{B}$, selon que l'observation est faite parallèlement ou perpendiculairement à ce champ (figure 6).

La *seconde période* de l'activité scientifique d'Alfred Kastler s'ouvre avec la collaboration de Jean Brossel à l'Ecole Normale Supérieure de Paris et la publication en 1949 du principe d'une méthode optique de détection des phénomènes de *résonance magnétique* des niveaux excités des atomes et des molécules, appelée "*méthode de double résonance*" parce qu'elle désigne l'application simultanée à un atome de deux champs électromagnétiques de fréquences différentes.

Alfred Kastler et Jean Brossel ont montré que l'on peut détecter la *résonance magnétique* d'un état atomique excité en observant la modification que subit l'état de *polarisation de la lumière de résonance optique* lorsqu'on applique à l'atome un champ magnétique de haute fréquence en résonance avec la fréquence de la précession de LARMOR de l'état excité (figure 7).

Familièrement parlant, il s'agit-là du mouvement de toupie pris par un atome en présence d'un aimant.

Alfred Kastler dit que le travail de pionnier dans cette voie a été la thèse de Jean Brossel soutenue à Paris en 1951 et consacrée à l'application de la méthode de double résonance au triplet 6^3P_1 du mercure issu du niveau fondamental $6s$ dont les longueurs d'onde sont $4046,55 \text{ \AA}$; $4358,34 \text{ \AA}$ et $5460,74 \text{ \AA}$.

En 1950, Alfred Kastler compléta cette méthode en publiant la "*méthode de pompage optique*".

Pour expliquer le principe de cette procédure nous nous inspirons de nouveau du texte écrit par Alfred Kastler lui-même.

On sait qu'aux états d'énergie quantifiés des atomes sont attachés des moments magnétiques analogues aux moments électriques. Lorsqu'un atome est soumis à un champ magnétique extérieur le moment magnétique global peut prendre différentes orientations dans l'espace par rapport à ce champ. Ces nouvelles orientations correspondent à des niveaux et sous-niveaux du type Zeeman (figure 6).

On peut comparer la succession de ces différents états d'énergie à un escalier dont la marche *la plus basse est la plus pauvre en énergie*. Au fur et à mesure que l'on gravit cet escalier les niveaux d'énergie s'enrichissent ; on les appelle "niveaux excités" (figure 3). Or la thermodynamique enseigne qu'une assemblée d'atomes a toujours tendance à se répartir dans un *équilibre thermique* obéissant à une loi statistique de Boltzman selon laquelle ce sont *toujours les niveaux les plus bas qui sont les plus peuplés*.

* définies par leurs mesures

** définies par leurs mesures et leurs directions

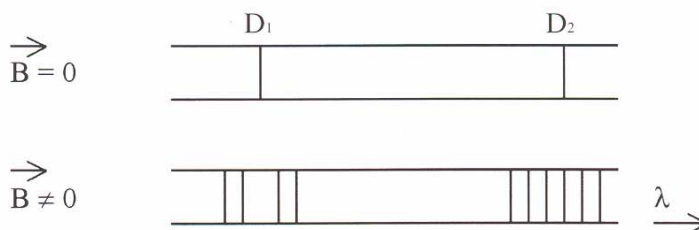


Figure 6

Effet Zeeman du sodium

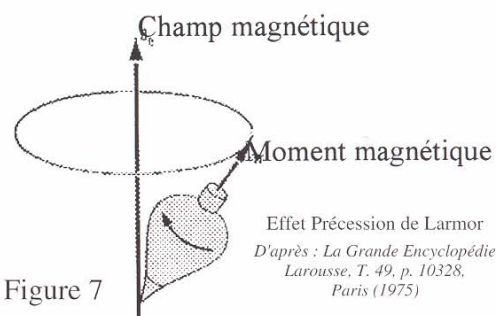
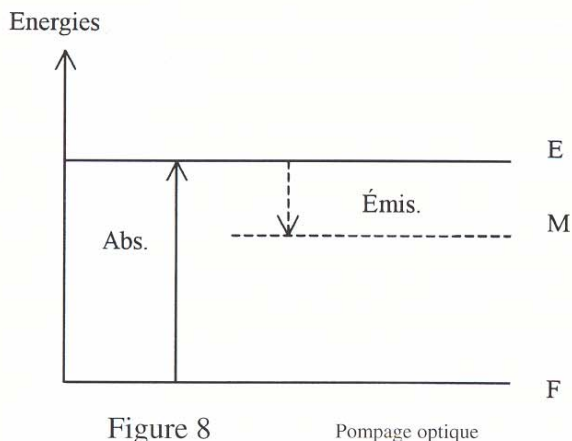


Figure 7



L'écart de population entre deux niveaux est d'autant plus accentué que ces niveaux sont plus éloignés l'un de l'autre en énergie et que la température est plus basse.

A très basse température tous les atomes se rassemblent à l'état fondamental F tandis que les *niveaux excités E* sont pratiquement vides (figure 8).

Mais une irradiation lumineuse intense suffit pour provoquer des transitions d'absorption portant l'atome du niveau fondamental F à un niveau excité E où il ne reste qu'un temps bref car la *durée de vie des états excités est très courte* ($<10^{-6}$ secondes), pour se dépeupler ensuite par une émission de lumière.

Si cette lumière ramène l'atome au niveau F on dit qu'il y a "résonance optique" ; cette émission peut aussi conduire vers un troisième niveau intermédiaire M qui peut avoir *une durée de vie longue* (compte tenu des processus de relaxation) ce qui permet le retour des atomes du niveau M au niveau F où ils peuvent s'accumuler en grand nombre (figure 8).

La suite des processus successifs $F \rightarrow E$ et $E \rightarrow M$ s'appelle "*pompage optique*". En résumé, le pompage optique est susceptible de produire *des changements de population* importants entre les niveaux des atomes.

S'il est appliqué aux atomes de façon continue, la répartition permanente des populations devient très différente de la répartition d'équilibre thermique. La population en atomes du niveau F peut même devenir inférieure à celle du niveau M.

On dit alors qu'on a réalisé une "*inversion de population*" entre F et M.

Alfred Kastler a montré que dans *des atomes paramagnétiques** les différents états excités intermédiaires et fondamentaux étaient multiples et composés de sous-niveaux.

On obtient alors des résultats très intéressants en polarisant circulairement la lumière que produit le pompage optique.

On note à ce propos que le faisceau lumineux composé de photons transporte lui aussi du spin qu'il transmet à la matière étudiée.

Alfred Kastler et ses collaborateurs ont également obtenu par pompage



A une réception de l'Académie d'Alsace en 1967.
De gauche à droite : Louis CHAROLLAIS, proviseur du lycée Bartholdi, Alfred KASTLER, Guy PERNY et ses étudiants, Edouard GREINER, ancien professeur de physique d'Alfred KASTLER.
Collection particulière.

* corps dont les constituants possèdent un moment électromagnétique permanent

optique l'orientation spatiale des *moments magnétiques nucléaires*, notamment Bernard Gagnac en 1960 et Claude Cohen-Tannoudji qui a trouvé, dès 1962, par des moyens *extraordinairement subtils et laborieux*, des interactions nouvelles entre matière et lumière.

Les applications des travaux d'Alfred Kastler et de ses collaborateurs à l'Ecole Normale Supérieure de Paris sur la méthode de double résonance et la méthode de pompage optique sont extrêmement nombreuses et universellement connues.

Elles trouvent leur utilisation en optique, en physique atomique et moléculaire, en physique nucléaire, en astronomie, en astronautique et dans l'industrie.

L'aspect économique de ces recherches a été considérable tout en étant parallèle à la promotion du savoir qu'elles avaient initié.

La Science doit beaucoup au physicien alsacien Alfred Kastler qui nous a quittés à Bandol (Var) le 7 Janvier 1984.

Une partie de ce mémoire a fait l'objet d'une allocution prononcée par l'auteur le 3 mai 2002 au Lycée de Guebwiller à l'occasion de la commémoration officielle du centenaire de la naissance d'Alfred Kastler en présence de sa famille et des autorités locales sous le haut patronage du Recteur de l'Académie de Strasbourg.

REFERENCES

1. A. KASTLER, Notice sur les titres et travaux scientifiques, Jouve éd. Paris (1958), compléments à cette notice (Janvier 1964)
 2. G. BRUHAT et A. KASTLER, Cours de Physique Générale, Optique, Masson et Cie, Paris (1965)
 3. J.P. MATHIEU, A. KASTLER, P. FLEURY, Dictionnaire de Physique, Masson-Eyrolles, Paris (1991)
 4. P. FLEURY, J.P. MATHIEU, Physique Générale et Expérimentale, Eyrolles, Paris, (1961-1969)
- La Grande Encyclopédie, Larousse, Paris (1971-1976)

Schlestadt

Place Forte

Pierre WALTER

Sélestadien de naissance, très inspiré de l'histoire en général et plus particulièrement de l'histoire de Sélestat, je retrace ici quelques grandes lignes que le commandant Lucien Kling avaient mises en pages dans un ouvrage intitulé : **"Schlestadt pendant la guerre"**,

Kling destinait sa notice (comme il l'appelait) à ses camarades de la Société amicale des anciens élèves du collège. Ces notes furent d'ailleurs achevées par Xavier Jehl, pharmacien principal de l'armée, et ami dévoué de Lucien Kling. Ont également participé à la réalisation du livre - Schlestadt pendant la guerre - M. Vatin : lieutenant d'artillerie de la garde mobile, préfet honoraire, Louis Gentil : chef de bataillon d'infanterie, qui avait le talent de reproduire les photographies prises après la reddition de la ville et Charles Schiffer : qui a mis beaucoup de soins à l'impression du livre de Kling.

1. Place Forte

Sélestat, place de guerre et chef-lieu d'arrondissement du département du Bas/Rhin, était en 1870, une ville de dix milles habitants. Bâtie dans la plaine, sur la rive gauche de l'Ill, à 14 kilomètres du Rhin et à 4 kilomètres des premiers contreforts des Vosges et de l'entrée de la vallée de la Lièpvre, elle était resserrée dans l'enceinte étroite de ses murailles élevées par Vauban.⁽¹⁾

Plusieurs routes y aboutissaient : celles du Rhin par Diebolsheim ou par Marckolsheim, celle de Saint-Dié par Sainte-Maire-aux-Mines, celle de Saverne par Molsheim et Barr.

La route nationale de Strasbourg à Bâle, longeait les glacis des fortifications à l'ouest. Parallèlement à cette voie, courait la ligne de chemin de fer de Strasbourg à Mulhouse et Belfort (à environ 300 mètres plus loin). L'embranchement de Ste Marie partait de la gare de Schlestadt en décrivant une courbe pour se diriger vers la vallée et restait en deçà du Giessen.

La grande forêt de l'Ill⁽²⁾ arrosée par de nombreux cours d'eau, séparait la ville à l'est des routes parallèles au Rhin.

La forteresse qui barrait des voies de communication importantes dans la partie la plus étroite du pays, pouvait être tournée facilement. Son importance stratégique se trouvait, par cela même, bien réduite⁽³⁾. Déjà il avait été question de la démanteler. Quelques années avant la guerre, elle fut ramenée au rang de place forte de 3e classe.

Après la reddition de Strasbourg, les Allemands devaient s'en emparer pour être maître de toute l'Alsace et posséder la libre disposition du chemin de fer avant d'aller assiéger Belfort.

2. Passé Militaire

Les Rois Francs qui avaient graduellement étendu leurs conquêtes dans le nord-est de la Gaule, s'étaient attribués des domaines considérables en Alsace, après avoir repoussé les Alamans sur la rive droite du Rhin vers la fin du V^e siècle⁽⁴⁾.

1) Superficie intra-murales : trente et un hectares environ.

2) Achetée par la ville en 1536 à l'abbaye de Conques en Rouerge, de qui dépendait Ste Foy.

3) Bien armée, elle aurait pu servir comme base de la défense mobile des Vosges. " La guerre de 1870-71 ".

4) L'emplacement actuel de Sélestat était occupé par les Gallo-Romains au III^e siècle. La construction d'une villa, rue de l'ancienne Poste, fit découvrir en 1902, sous une épaisse couche de débris et de cendre, de nombreuses monnaies romaines toutes antérieures à l'année 169. En 1910, des monnaies similaires furent trouvées lors de la construction d'une annexe à la caserne.