Le confort d'été dans les constructions scolaires à structure légère

J-C. Borel, J. Guibert

▶ **To cite this version:**

J-C. Borel, J. Guibert. Le confort d'été dans les constructions scolaires à structure légère. Cahiers du CSTB, 1969, Etudes et recherches, Livraison 104 (Cahier 910). hal-04073076

HAL Id: hal-04073076
https://cstb.hal.science/hal-04073076

Submitted on 18 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CAHIERS DU CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT ✳ N° 104
4, AVENUE DU RECTEUR-POINCARÉ, PARIS XVIe — TÉL. 525-61-01 et 288-81-80 NOVEMBRE 1969 — CAHIER 910

Le confort d'été dans les constructions scolaires à structure légère

Compte rendu d'une étude effectuée pour la Direction de l'Équipement Scolaire, Universitaire et Sportif du ministère de l'Éducation Nationale

par J. C. BOREL, ingénieur en chef au CSTB

suivi d'une revue bibliographique d'études étrangères sur le confort hygrothermique et la ventilation dans les salles de classe

par G. GUIBERT, ingénieur au CSTB

INTRODUCTION

L'augmentation constante des exigences de confort thermique rend de plus en plus difficile la réalisation du confort d'été. C'est particulièrement vrai lorsqu'une réduction du poids de la construction entraîne une diminution de l'inertie thermique. Mais ce peut être vrai également pour les constructions lourdes si les parois sont revêtues d'un isolant thermique, constitué par exemple par un absorbant acoustique, qui supprime l'effet de leur inertie thermique.

Le problème du confort d'été est à l'ordre du jour pour les immeubles de bureaux, où se développe la réfrigération, qui entraîne des dépenses d'investissement et d'exploitation importantes. Faudra-t-il aller aussi loin pour les écoles légères ?

L'étude dont on rend compte ici, effectuée pour la direction de l'Équipement Scolaire, Universitaire et Sportif du ministère de l'Éducation Nationale, montre que le problème du confort d'été dans les écoles légères peut être résolu de façon plus économique, au moyen d'une ventilation mécanique intense accompagnée éventuellement d'un refroidissement par évaporation d'eau. Le confort obtenu alors peut même être meilleur que ce qu'il est dans une école lourde classique.

Il n'est pas exclu que les possibilités offertes par ce procédé dans d'autres domaines (souplesse du chauffage et abaissement de la hauteur sous plafond) permettent d'en compenser le prix. D'autre part, si l'on utilise ce procédé, l'exposition des bâtiments, Est-Ouest ou Nord-Sud, n'a plus guère d'importance.

Depuis la fin de l'étude, une première installation de ventilation mécanique a été réalisée à titre expérimental dans trois classes d'un C.E.S. de la région parisienne. Les premiers résultats obtenus confirment les conclusions de l'étude. Une deuxième installation expérimentale, équipant un bâtiment entier, est en cours de construction dans le Midi.

A la suite du compte rendu, on trouvera une revue bibliographique d'études étrangères qui montre que le problème du confort d'été dans les locaux scolaires est à l'ordre du jour dans de nombreux pays, même sous des climats aussi doux l'été que ceux des pays scandinaves. Elle montre aussi que, lorsque ce problème n'est pas résolu, le travail des élèves en souffre.

On a recherché, dans ces études, ce qui se rattache aux solutions proposées dans le présent compte rendu. Les conclusions auxquelles on a abouti permettent d'augurer très favorablement de ces solutions.

C'est ainsi qu'une installation prévue pour assurer une ventilation intense pendant les jours chauds peut être utilisée à régime réduit toute l'année, notamment en hiver, pour assurer un débit d'environ 20 m³/h par élève. D'où, sur le plan du confort et de l'hygiène, une amélioration très sensible par rapport à la ventilation naturelle.

D'autre part, on peut lier à la ventilation mécanique un chauffage à air chaud qui, s'il est correctement réalisé, devrait être d'un grand intérêt non seulement pour le confort mais aussi pour les dépenses de chauffage.

INTRODUCTION

The constantly growing requirements with regard to thermal comfort are making the design for summer comfort increasingly difficult. This is especially sowhenever a reduction in the weight of the structure brings about a smaller heat capacity. But it can also be so for heavy buildings, if the walls are covered with an thermal insulating material, consisting for example of an acoustical absorber which eliminates the effect of their heat capacity.

The problem of summer comfort is of current interest for office buildings, where refrigeration is developing, bringing about large investment and operating expenses. Will it become necessary to go as far for the light-structure school buildings?

The study being examined here, carried out by the Department of School, University, and Sports Engineering of the French National Education Ministry, shows that the problem of summer comfort in light-structure school buildings may be solved more economically by means of an intense mechanical ventilation system, possibly in conjunction with a water evaporation cooling arrangement. The comfort then obtained may be even better than that of a conventional heavy-structure school building.

It is also possible that the possibilities offered by this process in other fields (flexibility of heating and lowering of height under ceiling) may permit its cost to be offset. Moreover, if this process is used, the east-west or north-south exposure of the buildings is hardly important.

Since the end of the study, a pilot mechanical ventilation installation was set up experimentally in three secondary school classes of the Paris region. The first results obtained confirm the conclusions of the study. A second experimental installation, equipping an entire building, is under construction in southern France.

Following the report of our study, there is a bibliographical review of studies carried out abroad, showing that there is a current awareness of the problem of comfort in school-rooms, in many countries, even in such mild summer climates as those of Scandinavian countries. They show that when this problem is not solved, the school-work of the pupils is affected.

These studies were examined as to their relationship with the solutions proposed by our own study. The conclusions reached allow us to be optimistic with regard to the validity of these solutions.

Thus, an installation designed for intensive ventilation in warm weather can be used at a lower duty rate throughout the whole year, particularly in winter, with a delivery of about 20 m³/h per pupil. This provides a very substantial improvement from the comfort and hygiene stand-points in comparison with natural ventilation.

Moreover, it is possible to combine this mechanical ventilation system with a warm air arrangement which, if properly designed, should be of great value not only for comfort but also from the heating expenditure view-point.

INDRODUCCION

El aumento constante de las necesidades de acondicionamiento térmico hace cada vez más difícil la realización de tal acondicionamiento para el verano. Esto es particularmente verdad cuando una reducción del peso de la construcción acarrea una disminución de la inercia térmica. Pero esto puede ser también verdad para las construcciones de estructura pesada si las paredes están cubiertas por un aislante térmico, formado por ejemplo por un absorbente acústico que suprima el efecto de su inercia térmica.

El problema del acondicionamiento es de actualidad en el caso de edificios de oficinas, en los que existe una refrigeración que produce importantes gastos de inversión y de explotación. ¿ Será preciso, pues, llegar hasta estos extremos en lo que se refiere a las construcciones escolares de estructura ligera ?.

El estudio del que se da cuenta en este trabajo y que ha sido efectuado para la Dirección de Suministros de Medios Escolares, Universitarios y Deportivos del Ministerio francés de Educación Nacional, demuestra que el problema del acondicionamiento para el verano en las escuelas con estructura ligera puede resolverse de forma más económica mediante una ventilación mécánica intensa, acompañada eventualmenté de una refrigeración por evaporación de agua. El acondicionamiento que se logre entonces puede incluso ser mejor de lo que resulta en una escuela de estructura pesada clásica.

No se excluye el hecho de que las posibilidades que brinda este procedimiento en otros campos (flexibilidad de calefacción y disminución de la altura bajo techo) permiten compensar su precio. Por otra parte, si se utiliza este procedimiento, la orientación de los edificios al este-oeste o norte-sur ya no tiene apenas importancia.

Desde la terminación del estudio, se ha realizado experimentalmente una primera instalación de ventilación mecánica en tres clases de un C.E.S. de la región parisiense. Los primeros resultados obtenidos confirman las conclusiones del estudio. Actualmente se está construyendo en el sur de Francia una segunda instalación experimental, como equipo de un edificio entero.

A continuación de la exposición de nuestro estudio, se podrá encontrar una revista bibliográfica de estudios extranjeros, en la que se indica que el problema del acondicionamiento para el verano en los locales escolares es de actualidad en numerosos países, incluso en aquéllos que tienen climas tan suaves en verano como los de los países escandinavos. También se señala en ella que cuando este problema no se resuelve, entonces el trabajo de los alumnos se resiente de ello.

En estos estudios se ha buscado aquello que tiene conexión con las soluciones propuestas en nuestro propio estudio. Las conclusiones a las que se ha llegado permiten hacer pronósticos muy favorables sobre estas soluciones.

Así es como una instalación prevista para garantizar una ventilación intensa durante los días cálidos puede utilizarse en régimen reducido todo el año, especialmente en invierno, para proporcionar una corriente de aproximadamente 20 m³/h por alumno, de donde resulta, en el plano de acondicionamiento y de higiene, una mejora muy notable con relación a la ventilación natural.

Por otro lado, se puede unir a la ventilación mecánica una calefacción de aire caliente que, si se realiza correctamente, tendría que resultar muy interesante no sólo para el acondicionamiento sino también para los gastos de calefacción.

COMPTE RENDU RÉSUMÉ

Le problème posé était de savoir quelles températures sont atteintes dans les constructions scolaires très légères et de déterminer les remèdes nécessaires pour abaisser ces températures.

1. Pour situer le problème, on a enregistré, pendant une période chaude ensoleillée, les températures atteintes dans un lycée de construction très légère, dans un lycée de construction moyennement lourde et dans un lycée lourd, tous ces établissements se trouvant dans la région parisienne.

Le lycée léger A, de faible inertie thermique, est une construction métallique où aucun matériau lourd, en particulier aucun béton, n'est employé.

Le lycée semi-lourd D, d'inertie thermique moyenne, est une construction métallique avec des planchers en béton.

Le lycée lourd E, de forte inertie thermique, est un bâtiment à rez-de-chaussée, avec des murs extérieurs lourds et une toiture terrasse.

Tous ces lycées sont des bâtiments « à deux classes d'épaisseur » avec un couloir central.

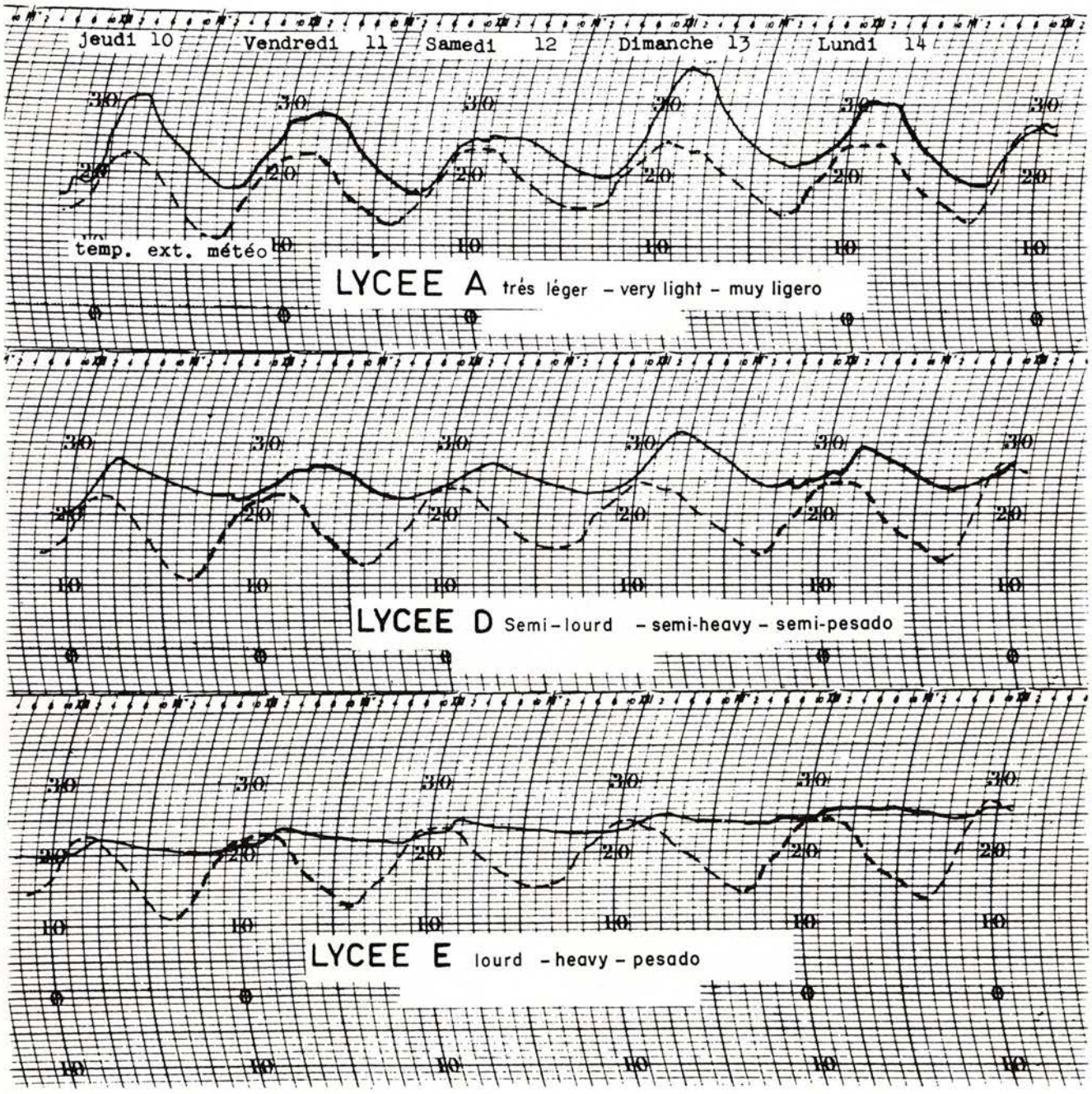


Figure 1

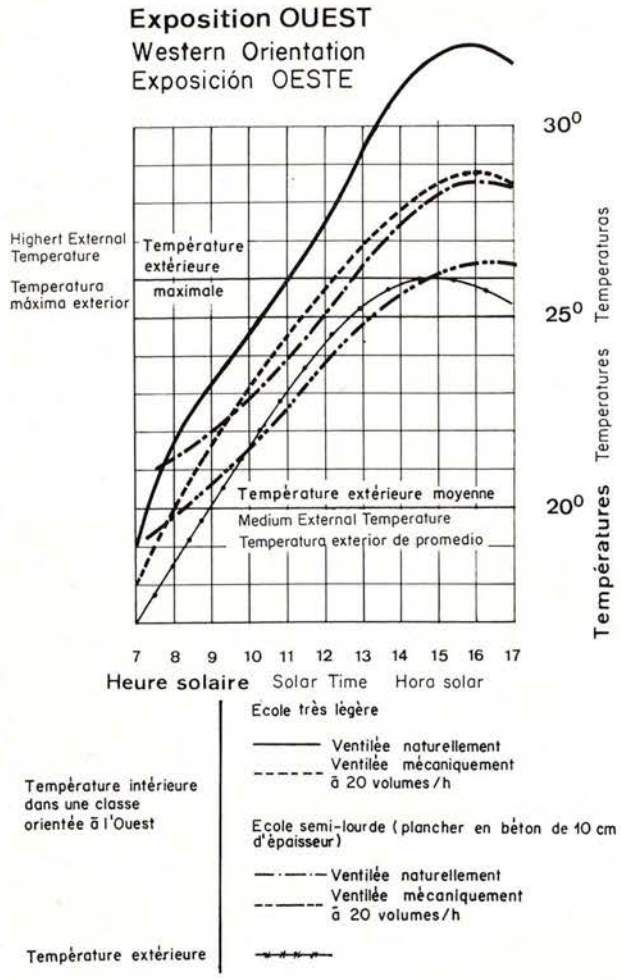


Figure 2

Les parois extérieures du lycée très léger et du lycée semi-lourd sont analogues; leurs parois vitrées ont la même surface 13,5 m² pour une classe de 60 m² et sont protégées du soleil par des stores de toile extérieurs projetés à l'italienne, ayant un facteur solaire S de 0,15.

Le lycée lourd a aussi une surface vitrée de 13,5 m² par classe, mais dont la protection solaire constituée d'un verre teinté et d'un store intérieur est médiocre (S = 0,42).

La figure 1 donne les enregistrements de température dans des classes exposées au Sud-Ouest de ces trois lycées, pendant la période du 10 au 15 juin où l'on trouve plusieurs journées ensoleillées et où les classes sont occupées. Est aussi donnée la température extérieure (température extérieure météo mesurée sous abri).

En utilisant toutes les ressources de protection des bâtiments (stores extérieurs baissés, fenêtres ouvertes) pendant une journée d'ensoleillement continu où les lycées sont occupés, *dans la classe exposée au Sud-Ouest du lycée très léger, la température maximale est à 6° au-dessus de la température maximale extérieure.*

La différence entre le lycée très léger et le lycée lourd atteint 5°. Le lycée semi-lourd (lycée léger avec plancher en béton) donne un résultat intermédiaire : 2° de moins que le lycée très léger.

L'exposition de ces classes fait partie des expositions les plus défavorables qui vont du Sud-Ouest à l'Ouest-Nord-Ouest et qui donnent à peu près les mêmes températures intérieures.

Sur une exposition Sud, la température intérieure maximale dans un lycée très léger dépasse de 4° au lieu de 6° le maximum de température extérieure. Sur une exposition Est ou Nord, l'écart est de 3°.

La situation de la classe dans le bâtiment (contre un pignon, sous toiture) ne modifie pas les écarts ci-dessus, sauf pour les classes sous toiture au Sud où la température intérieure est majorée de 1° à 2° (les maximums d'ensoleillement sur la façade et la toiture coïncident) ; elle est alors voisine de celle atteinte pour les expositions les plus défavorables.

2. Les conditions intérieures dans des écoles très légères peuvent donc être actuellement très inconfortables.

Un perfectionnement de la ventilation naturelle n'améliorera guère la situation.

Pour obtenir une véritable amélioration, sans modifier profondément la conception des écoles métalliques, l'étude a montré qu'il n'y a pratiquement que deux aménagements possibles :

— soit une *ventilation mécanique intense* assurant un renouvellement d'air d'environ 20 fois le volume de la classe par heure,

— soit une *dalle pleine en béton* constituant le plancher.

Les courbes de la figure 2 montrent le résultat obtenu par l'emploi de l'un ou de l'autre de ces aménagements ou des deux simultanément sur une exposition Ouest. Ces courbes résultent de calculs effectués par analogie électrique et recoupés par des mesures *in situ*.

Nombre de jours scolaires où, pendant une année normale, la température intérieure de la classe atteint ou dépasse une valeur donnée

Exposition de la classe		Ouest Sud et sous-toiture			Est Nord Sud et non sous-toiture		
Température intérieure atteinte ou dépassée		26°	28°	30°	26°	28°	30°
		jours	jours	jours	jours	jours	jours
A PARIS :							
École très légère	ventilée naturellement (situation actuelle)	20	14	8	15	8	5
	ventilée mécaniquement à 20 volumes/heure	12	7	3	10	6	2
École avec plancher de béton de 10 cm en plancher	ventilée naturellement						
	ventilée mécaniquement à 20 volumes/heure	6	3	1	6	3	1
A MONTPELLIER :							
École très légère	ventilée naturellement (situation actuelle)	56	46	34	49	36	23
	ventilée mécaniquement à 20 volumes/heure	44	31	17	40	26	13
École avec plancher de béton de 10 cm en plancher	ventilée naturellement						
	ventilée mécaniquement à 20 volumes/heure	28	16	6	28	16	6

Elles supposent que la protection solaire des baies vitrées est assez bonne (stores de toile opaque extérieurs). Une amélioration de la protection solaire de la façade n'aurait que peu d'intérêt. En effet, une protection excellente (diminution de la surface des baies, stores vénitiens extérieurs, pare-soleil devant les parois opaques) réduit de moitié les apports solaires mais par rapport aux apports totaux, la diminution est au plus de 30 %, car les apports dus aux élèves restent inchangés.

D'autre part, à cause précisément de l'importance des apports dus aux élèves, l'exposition Sud-Nord ne présente guère d'avantage sur l'exposition Est-Ouest lorsqu'il y a ventilation mécanique ou plancher en béton et, encore moins, lorsqu'on prévoit ces deux aménagements (cependant l'exposition Sud-Nord permet de prévoir au Sud des pare-soleil horizontaux fixes c'est-à-dire robustes et d'économiser les protections au Nord).

3. En ce qui concerne la fréquence de l'inconfort, le tableau ci-dessus donne le nombre de jours scolaires (on a supprimé les jeudis, les dimanches et les mois de juillet et août) où la température intérieure dépasse une température donnée, à Paris et à Montpellier (une des villes les plus chaudes du Midi), dans des écoles légères avec et sans améliorations pendant une année normale.

Pour amener, dans des écoles très légères, le confort d'été au niveau de celui régnant actuellement dans les écoles traditionnelles, une seule amélioration (plancher en béton ou ventilation mécanique) est nécessaire dans la moitié Nord de la France; dans la moitié Sud les deux sont nécessaires.

Toutefois, la ventilation mécanique offre la *possibilité d'un refroidissement de l'air par évaporation d'eau,;* il est alors possible dans certaines conditions de créer un confort meilleur que dans les écoles traditionnelles ventilées naturellement.

D'autre part, avec une ventilation mécanique assurant à toute époque de l'année un apport important d'air neuf, il est peut-être possible d'abaisser la hauteur sous plafond, d'où une économie susceptible de compenser le prix de la ventilation.

Des études sont en cours sur la ventilation mécanique accompagnée d'un refroidissement par évaporation d'eau et sur la possibilité d'abaisser la hauteur sous plafond (influence sur le comportement des élèves, éclairage de la classe...).

DIGEST

The problem was to determine the highest temperatures encountered in very light education al building and to define means of reducing them.

1. With this object, temperatures have been recorded during a warm and sunny period in three secondary schools around Paris. School A was a light construction, school D was a medium light construction and school E was a heavy construction.

School A has a low thermal inertia it is a steel structure, without any heavy component (for instance no concrete has been used).

School D has a medium thermal inertia; it is a steel structure with concrete floors.

School E has a high thermal inertia; it is a one storey construction with heavy external walls and with heavy flat roof.

All these schools are "two classroom wide constructions" it means that the classrooms are distributed on both sides of a central corridor.

The external walls of constructions A and D are similar: for a 60 m² classroom, both of them have a 13,5 m² surface of glazed openings; the sun protection is achieved by the mean of external canvas awnings "solar factor" (S = 0,15).

In the heavy structure construction, the surface of openings per classroom is 13,5 m² too but the sun protection, achieved by the means of heat absorbing glass and internal blinds is poor (S = 0,42).

Figure 1 (page 3) Shows the temperatures recorded in the three schools for south-west oriented classrooms, during the period 10-15 of June. During this period there had been several sunny days and the classrooms were occupied by the pupils. The external temperatures are also shown on the figure (meteorological external temperatures recorded under cover).

When using all the protection ressources of the constructions (blinds closed, windows open) during a sunny day when the classrooms were occupied, *the highest temperature recorded in the S. W. oriented classroom of the light construction is 6° higher than the highest external temperature.*

There is a difference of 5° between the temperature inside the very light construction and the temperature inside the heavy-one. The medium construction (light structure with concrete floors) gives intermediate results: 2° less than the light construction.

The orientation of these classrooms are among the most unfavorable ones (which vary from south-west to west-northwest and lead to quite similar internal temperatures).

If the classroom is oriented to the south, the highest internal temperature of a light construction is 4° (instead of 6°) higher than the highest external temperature. If oriented to the east or the north, the deviation is 3°.

The position of the classroom in the construction (on the gable end, under the roof) does not modify the above deviations, except in the case of south oriented classrooms under the roof: in this last case, the internal temperature is 1° to 2° higher. (the maximum insolation on the façade coincides with the maximum on the roof) and became about equal to the one corresponding to the most unfavorable orientation.

2. It appears that the conditions encountered in the very light schools can be very uncomfortable.

A more efficient natural ventilation will not really improve the situation

The study has shown that there are indeed two practical ways of improving the situation without modifying the design of the steel structured school :

— either an *intense mechanical ventilation* which renews the volume of air of the classroom 20 times per hour.

— ora floor made of a *concrete slabs.*

The diagrams given on figure 2 (page 4) show the results obtained by using one of these two methods or both of them simultaneousty for a west oriented classroom. These diagrams have been obtained by electrical simulation and verified by measurements *"in situ"*.

The diagrams suppose that sun protection of the windows is efficient (outside blinds) An improvement of the sun protection of the facade would be of little interet, because an excellent external protection (reduction of the surface of the openings, external venetian blinds, screen in front of opaque walls) reduce by half the solar heat gain but the total heat is reduced only by 30% because it does not affect the heat gain due to the pupils. Furthermore owing to the relative importance of the heat gain due to the pupils, the south north orientation is not more profitable than the east-west orientation when there is a mechanical ventilation or a concrete floor, or both of them (yet, the south north orientation allows the use of horizontal and fixed-therefore resistant—sun shields on the southern facade and avoids the installation of any protection on the northern facade).

Number of worked days, during a normal year, when the internal temperature of the classroom is equal or higher than a given temperature

Orientation of the classroom		West South and under the roof			East North South and not under the roof		
Internal temperature reached or exceeded		26°	28°	30°	26°	28°	30°
		Number of days	Number of days	Number of days	Number of days	Number of days	Number of days
In PARIS :							
Very light school	natural ventilation (presently)	20	14	8	15	8	5
	mechanical ventilation (20 volumes/hour)	12	7	3	10	6	2
School with a 10 cm thick concrete floor	natural ventilation						
	mechanical ventilation	6	3	1	6	3	1
In MONTPELLIER :							
Very light school	natural ventilation (presently)	56	46	34	49	36	23
	mechanical ventilation (20 volumes/hour)	44	31	17	40	26	13
School with a 10 cm thick concrete floor	Natural ventilation						
	mechanical ventilation	28	16	6	28	16	6

3. Concerning the frequency of the disconfort sensation, the plate here above gives the number of worked days (Thursdays, Sundays July and August have been suppressed) when the internal temperature is higher than a given temperature all over a normal year, these figures are given for light classrooms (with and without the previously described improvements) situated in Paris and Montpellier (one of the warmest town in south of France).

In the Northern part of France, light classrooms only require one improvement to offer, in summer, the same confort as the one existing in regular school buildings. In the southern part of France, both improvement are necessary to obtain the same result.

However the mechanical ventilation allows to *cool the air by evaporation of water*; therefore under some conditions it is sometines possible to create in these schools a better confort than in regular schools, ventilated naturally.

Furthemore, with a mechanical ventilation providing during the whole year an important circulation of fresh air it may be possible to reduce the height of the classroom and this sawing may balance the cost of the ventilation system.

The possibility of a mechanical ventilation associated with a cooling by evaporation of water and the reduction of the height of the classrooms are presently the subjects of several studies (influence on the behaviour of the pupils, lighting of the classrooms, etc...).

ARTICULO CONDENSADO

El problema planteado consistía en saber cuáles son las temperaturas alcanzadas en las construcciones escolares muy ligeras y determinar los remedios necesarios para disminuir dichas temperaturas.

1. Para situar el problema, se ha registrado durante un periodo cálido soleado, las temperaturas alcanzadas en un instituto de segunda enseñanza muy ligero, en un instituto de construcción medianamente pesada y en un instituto de construcción pesada, todos ellos situados en la región parisiense.

El instituto ligero A, de inercia térmica reducida, es una construcción metálica en la cual no se ha empleado ningún material pesado, y en particular, el hormigón.

El instituto semipesado D, de inercia térmica media, es una construcción metálica con forjados de hormigón.

El instituto pesado E, de fuerte inercia térmica, es un edificio con planta baja con muros exteriores pesados y un tejado en terraza.

Todos estos institutos son edificios « de dos clases de espesor », con pasillo central.

Las paredes exteriores del instituto muy ligero y del instituto semipesado son análogas. Sus paredes vidrieras presentan la misma superficie, es decir, 13,5 m² para una clase de 60 m² y están protegidas del sol por medio de toldos exteriores del tipo proyeccion, a la italiana, y que tienen un factor solar S de 0,15.

El instituto pesado tiene también una superficie acristalada de 13,5 m² por clase, pero la protección solar está constituida por un cristal de color y un toldo interior, protección considerada como mediocre (S = 0,42).

La figura 1 (pagina 3) indica las temperaturas registradas en las clases expuestas al Sudoeste de estos tres establecimientos de segunda enseñanza durante el periodo del 10 al 15 de junio, en donde figuran varias jornadas soleadas en que las aulas han estado ocupadas. También se indica la temperatura exterior (temperatura exterior meteorológica tomada al resguardo del viento).

Utilizando todos los recursos de protección de los edificios (toldos exteriores bajados, ventanas abiertas) durante una jornada continuamente soleada en la cual estos establecimientos docentes han estado ocupados, *en el aula expuesta al Sudoeste del instituto muy ligero, la temperatura máxima es de 6 °C superior de la temperatura máxima exterior.*

La diferencia entre el instituto muy ligero y el instituto pesado alcanza 5 °C. El instituto semipesado (edificio ligero con forjado de hormigón) proporciona un resultado intermedio: 2 °C menos que el instituto de construcción muy ligera.

La exposición de estas aulas forma parte de las exposiciones más desfavorables, que van del Sudoeste al Oeste-Noroeste y que arrojan, poco más o menos, las mismas temperaturas interiores.

En una exposición Sur, la temperatura interior máxima en un instituto muy ligero es superior de 4° C en lugar de 6° C, la temperatura exterior máxima registradas. Para una exposición Norte o Este, la diferencia es de 3° C.

La situación del aula en el edificio (en un muro lateral, bajo la techumbre) no modifica las diferencias anteriormente mencionadas, excepto por lo que se refiere a las aulas bajo la techumbre expuestas al Sur, en cuyo caso la temperatura interior queda aumentada de 1 a 2° C (las temperaturas máximas de soleamiento en la fachada y en la techumbre coinciden). En este caso, la temperatura es cercana de aquella alcanzada para las exposiciones más desfavorables.

2. Las condiciones interiores en las escuelas muy ligeras pueden, por consiguiente, ser muy inconfortables en la actualidad.

Un perfeccionamiento de la ventilación natural alterará apenas esta situación.

Para obtener una verdadera mejora, sin modificar profundamente el diseño de las escuelas metálicas, el estudio ha demostrado que únicamente cabe considerar dos disposiciones posibles:

— ya sea una *ventilación mecánica intensa*, que permita una renovación del aire de unas 20 veces el volumen del aula por hora,

— o bien, una *losa compacta de hormigón*, que constituye el forjado.

Las curvas de la figura 2 (pagina 4) permiten apreciar el resultado obtenido por el empleo de una u otra de estas disposiciones o de ambas simultáneamente, en una exposición Oeste. Estas curvas se derivan de cálculos efectuados por analogía eléctricas y verificados por medidas *in situ*.

En dichas condiciones se supone que la protección solar de los ventanales vidrieras sea bastante correcta (toldos de lona opaca exteriores). Una mejora de la protección solar de la fachada presentaría muy poco interés ya que, efectivamente, una proteccion excelente (disminución de la superficie de los ventanales, persianas venecianas exteriores, parasoles ante las paredes opacas) reduce a su mitad las aportaciones solares, pero, en relación con las aportaciones totales, la disminución obtenida es, como máximo, de un 30 %, ya que las aportaciones térmicas derivadas de los alumnos presentes en el aulo no sufren alteración alguna.

Número de días escolares durante los cuales, en un año normal, la temperatura interior del aula alcanza o sobrepasa un valor determinado

Exposición del aula		Oeste Sur y bajo techumbre			Este Norte Sur y no bajo techumbre		
Temperatura interior alcanzada o sobrepasada		26°	28°	30°	26°	28°	30°
		días	días	días	días	días	días
En PARIS :							
Escuela muy ligera	ventilada naturalmente (situación actual)	20	14	8	15	8	5
	ventilada mecánica a razón de 20 volúmenes por hora	12	7	3	10	6	2
Escuela con forjado de hormigón de 10 cm de espesor	ventilada naturalmente						
	ventilada mecánicamente a razón de 20 volúmenes por hora	6	3	1	6	3	1
En MONTPELLIER :							
Escuela muy ligera	ventilada naturelmente (situación actual)	56	46	34	49	36	23
	ventilada mecánica a razón de 20 volúmenes por hora	44	31	17	40	26	13
Escuela con forjado de hormigón de 10 cm de espesor	ventilada naturalmente						
	ventilada mecánicamente a razón de 20 volúmenes por hora	28	16	6	28	16	6

Por otra parte, y precisamente a causa de la importancia de las aportaciones térmicas debidas a los alumnos, la exposición Sur-Norte apenas presenta ventajas respecto a la exposición Este-Oeste cuando existe una ventilación mecánica o un forjado de hormigón y menos aún cuando no se han tenido en cuenta estas dos disposiciones (no obstante, la exposición Sur-Norte permite disponer en el Sur parasoles horizontales fijos, es decir, sólidos, y economizar las protecciones en el Norte).

3. Por lo que se refiere a la frecuencia de la falta de confort, la tabla anterior indica el número de los días escolares (se han suprimido los jueves y domingos, así como los meses de julio y agosto) durante los cuales la temperatura interior sobrepasa un valor determinado, en París y en Montpellier (una de las ciudades más cálidas del mediodía de Francia), en escuelas ligeras, dotadas o no de las mejoras preconizadas, durante un año normal.

Para obtener, en las escuelas muy ligeras, en confort de verano al nivel de aquel reinante actualmente en las escuelas clásicas, una sola mejora (forjado de hormigón o ventilación mecánica) es necesaria en la mitad Norte de Francia. En la mitad Sur, ambas son necesarias.

No obstante, la ventilación mecánica presenta la *posibilidad de un enfriamiento del aire por evaporación de agua*, siendo entonces posible, en ciertas condiciones, lograr un mejor confort que en las escuelas clásicas ventiladas naturalmente.

Se encuentran en curso sendos estudios acerca de la ventilación mecánica acompañada de un enfriamiento por evaporación de agua y, asimismo, acerca de la posibilidad de reducir la altura de techo (influencia sobre el comportamiento de los alumnos, alumbrado del aula, etc.).

SOMMAIRE

A. Plan de l'étude 11

B. Étude expérimentale et théorique de bâtiments existants 11

I. Description des bâtiments 11
1. Bâtiments de faible inertie thermique (lycées A, B et C) 11
2. Bâtiments d'inertie thermique moyenne (lycée D) 14
3. Bâtiments de forte inertie thermique (lycée E) 15

II. Étude expérimentale. Enregistrements de température à l'intérieur des classes 17
1. Comparaison entre les divers lycées 17
2. Comparaison entre les classes de situations différentes (intermédiaires, sous-toiture, contre pignon) d'un lycée très léger (C) 17

III. Calculs, comparaison avec les enregistrements 20
1. Données climatiques prises en compte dans les calculs 20
2. Bâtiments d'inertie thermique négligeable (lycées légers A, B et C) 20
3. Bâtiments d'inertie thermique non négligeable 22
3,1. Lycée semi-lourd (D) 22
3,2. Lycée lourd (E) 23

C. Influence sur le confort thermique, pendant le mois de juin à Paris, de certains aménagements applicables au x constructions scolaires très légères 23

I. Diminution des apports solaires 23
1. Apports solaires par les baies vitrées 24
2. Apports solaires par les parois opaques 24
3. Bilan des réductions possibles des apports solaires 25

I. Ventilation naturelle améliorée, ventilation mécanique, avec humidification éventuelle 26
1. Ventilation naturelle améliorée 26
2. Ventilation mécanique accompagnée éventuellement d'une humidification de l'air 28

III. Augmentation de l'inertie thermique 33

IV. Superposition des différents aménagements proposés 33

D. Étude du confort, pendant tous les jours chauds de l'année scolaire à Paris et à Montpellier, dans les écoles métalliques avec et sans amélioration et dans les écoles traditionnelles 35

I. Écoles métalliques avec et sans amélioration 35
1. Amélioration sans humidification de l'air 35
2. Ventilation mécanique accompagnée d'une humidification de l'air 37
3. Prix du fonctionnement de la ventilation mécanique avec et sans humidification 38

II. Écoles traditionnelles 38

E. Conclusions 39

ANNEXES

I. Détermination de la courbe de température intérieure dans une classe ayant une certaine inertie thermique (calcul par analogie électrique) L. Bertolo 41

II. Fréquence des températures intérieures maximales à Paris et Montpellier dans les écoles légères avec et sans amélioration ... 45

III. Étude des possibilités d'amélioration du confort thermique par humidification de l'air en saison chaude à Paris et à Monptellier 47

COMPTE RENDU DÉTAILLÉ

A. Plan de l'étude

Au chapitre B, au moyen d'enregistrements de températures *in situ*, on compare le confort obtenu dans des bâtiments d'inertie différente. Les enregistrements mettent en évidence un amortissement des pointes de chaleur, d'autant plus faible que le bâtiment est plus léger, ils situent l'importance du problème du confort d'été dans les écoles légères. Les résultats expérimentaux sont confirmés par le calcul.

Au chapitre C, est examinée, pour une journée chaude et ensoleillée, l'amélioration de confort que permettent certains aménagements applicables aux constructions légères, sans en faire des bâtiments lourds.

Le chapitre D étend les résultats du chapitre C à toutes les journées chaudes de l'été à Paris et à Montpellier.

En conclusion, sont repris les différents résultats de l'étude et données des recommandations pour obtenir, dans une école légère, un confort d'été équivalent à celui existant dans les écoles lourdes traditionnelles.

B. Étude expérimentale et théorique de bâtiments existants

Pendant une période chaude et ensoleillée, on a comparé les températures à l'intérieur de trois lycées de construction très légère A, B et C et celles obtenues dans un lycée de construction moyennement lourde D et dans un lycée lourd E, tous ces établissements se trouvant dans la région parisienne.

Les « lycées légers » A, B, C de faible inertie thermique sont des constructions métalliques de structures identiques, où aucun matériau lourd, en particulier aucun béton, n'est employé.

Le « lycée semi-lourd » D, d'inertie thermique moyenne, est une construction métallique avec des planchers en béton.

Le « lycée lourd » E, de forte inertie thermique, est un bâtiment à rez-de-chaussée avec des murs extérieurs lourds et une toiture-terrasse.

Tous les lycées sont des bâtiments « à deux classes d'épaisseur » avec un couloir central, le module de construction étant de 1,75 m.

L'étude porte sur une salle de classe normale de 8,75 m de longueur, de 7 m de profondeur et de 3 m de hauteur sous plafond.

Au paragraphe I, on définit les parois extérieures (façades, pignons et toiture) et intérieures (planchers, cloisons), la protection solaire et le mode de ventilation de chacun de ces lycées. Les résultats des observations sont exposés au paragraphe II. Le paragraphe III donne des calculs confirmant et expliquant les résultats des observations.

I. Description des bâtiments

1. Bâtiments de faible inertie thermique. Lycées légers A, B, C

Ce sont des bâtiments R + 1 et R + 2.

1,1. Parois extérieures

a) *Façade* (fig. 1)

Elle est faite de panneaux vitrés et opaques placés entre des poteaux porteurs habillés d'une tôle.

Les panneaux opaques légers sont placés en allège et ont une ossature et des parements métalliques reliés entre eux sans coupure isolante ; l'âme des panneaux est faite d'une laine minérale de 5 cm d'épaisseur.

Le coefficient de transmission thermique K du panneau seul (156 cm × 96 cm) est donné par la formule (1) :

$$K = K_0 + \frac{P}{A}\sqrt{\varepsilon\lambda_m}$$

K_0 : coefficient de transmission en partie courante

$$K = 0{,}8 \text{ kcal/m}^2\text{.h}$$

P et A : périmètre et surface du panneau

$$P = 5{,}04 \text{ m} \qquad A = 1{,}5 \text{ m}^2$$

ε : épaisseur des parements métalliques

$$\varepsilon = 0{,}8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

λ_m : conductivité des parements métalliques (acier)

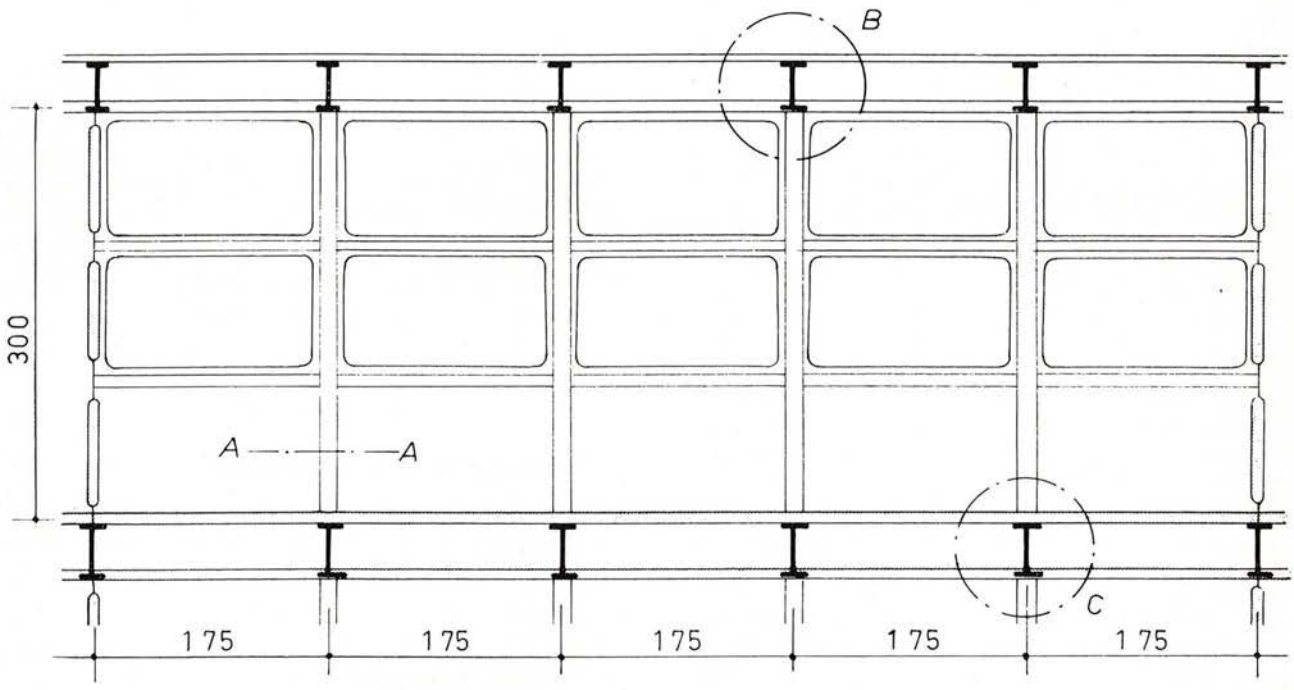
$$\lambda_m = 45 \text{ kcal/m.h.}^\circ\text{C}$$

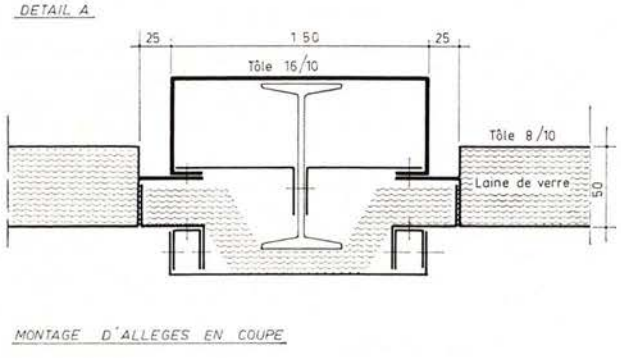
ce qui conduit à

$$K = 1{,}4 \text{ kcal/m}^2\text{.h.}^\circ\text{C}$$

On a en allège 5 panneaux pleins soit une surface de 7,5 m². La surface des autres parties opaques (poteaux, encadrement des panneaux opaques et des panneaux vitrés) est de 5,25 m² avec un coefficient K que l'on peut prendre égal à 5 étant donnée l'importance des ponts thermiques.

1. Voir DTU « Règles de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois de construction et des déperditions de base du bâtiment », § 1.215.3





LYCÉE A, B ou C

Figure 1

D'où pour les parois opaques une surface totale de 12,75 m² avec un coefficient K moyen égal à :

$$\frac{1{,}4 \times 7{,}50 + 5 \times 5{,}25}{12{,}75} = 2{,}9 \text{ kcal/m}^2\text{.h.}^\circ\text{C}$$

Il y a pour une salle de classe 10 panneaux vitrés avec une surface totale de vitre de 13,5 m² (10 fois 150 cm × 90 cm) de coefficient K égal à 5 kcal/m².h.°C.

La surface totale de la façade est donc de 26,25 m² avec un coefficient K moyen égal à :

$$\frac{2{,}9 \times 12{,}75 + 5 \times 13{,}5}{26{,}25} = 4 \text{ kcal/m}^2\text{.h.}^\circ\text{C.}$$

b) Pignons

Les pignons sont faits avec les mêmes panneaux opaques, que ceux utilisés en façade, le rapport des surfaces panneaux et liaisons étant le même que pour l'allège.

La surface totale du mur pignon d'une classe est de 21 m² avec un coefficient K moyen de 2,9 kcal/m².h.°C.

c) Toiture (fig. 2)

De bas en haut elle se compose de :

— 3 cm de laine de verre,
— un vide d'air non ventilé où passent les poutres en treillis métallique de la toiture,
— 3 cm d'Isorel isolant recouvert d'une étanchéité et de gravillons.

Le coefficient K de cet ensemble est de 0,7 kcal/m².h.°C.

1,2. Parois intérieures

Les cloisons entre classes ont 64 mm d'épaisseur et sont composées de deux plaques de placoplâtre séparées par un nid d'abeilles.

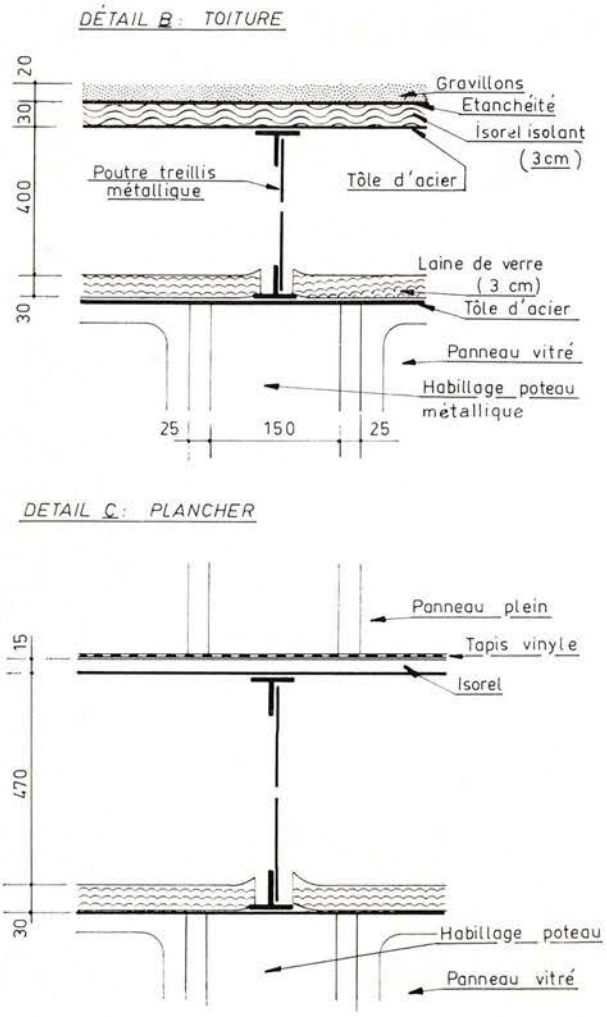


Figure 2

La cloison côté couloir a, en partie haute, 5 panneaux vitrés semblables à ceux des façades. Le bas est fait de panneaux opaques identiques à ceux des façades, sauf à l'emplacement des portes. La surface de l'ensemble est de 26,2 m², le coefficient de transmission étant de 3,2 kcal/m².h.°C.

De bas en haut, le plancher (fig. 2) se compose de 3 cm de laine de verre, d'un vide d'air non ventilé où passent les poutres en treillis métallique support du plancher et de 15 mm d'Isorel isolant recouvert d'un revêtement de sol en vinyle.

1,3. Protections solaires

Les baies vitrées (fig. 3) sont équipées de stores de toile bleu foncé, extérieurs et projetés à l'italienne, chaque module étant protégé par un store laissant un jour de 25 cm avec le store du module voisin.

Lorsque le soleil est en face de la façade, à une hauteur de 45°, les vitres sont complètement à l'ombre et le facteur solaire est alors de 0,12 (cf. Cahier 608 du CSTB).

Quand le soleil n'est plus en face de la façade, les jours entre stores laissent pénétrer une partie du rayonnement direct. Pour l'exposition SO que nous avons expérimentée on peut tabler sur un facteur solaire moyen de 0,15.

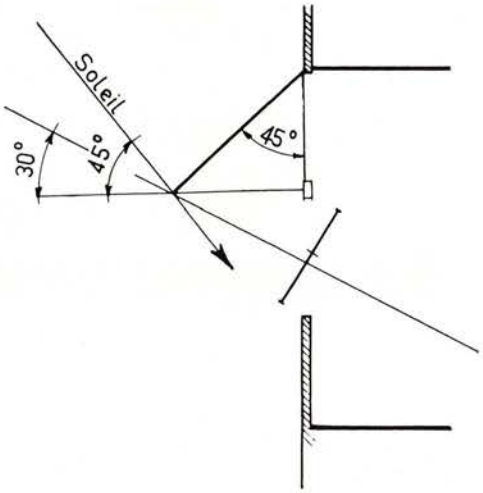
Ces stores mettent aussi à l'ombre l'encadrement des baies (2 m² de parois opaques) au moment où le soleil est en face de la façade.

Les autres *surfaces opaques* ne sont pas protégées du soleil. La couleur des panneaux est en général grise, ce qui correspond à un coefficient d'absorption du rayonnement solaire d'environ 0,75.

1,4. Ventilation

Pour assurer la ventilation, trois panneaux vitrés de la façade s'ouvrent sur l'extérieur en basculant autour d'un axe horizontal, d'où une surface totale d'ouverture de 4 m².

Il n'y a pas de panneaux vitrés ouvrant sur le couloir; la seule ventilation possible se fait par les portes ouvertes.



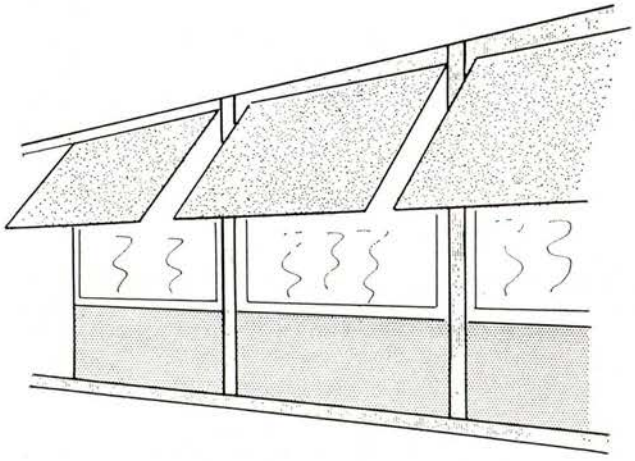


Figure 3
Stores, projetés à l'italienne, des lycées A,B,C,D.

COUPE D'UNE CLASSE PARALLELEMENT A LA FAÇADE

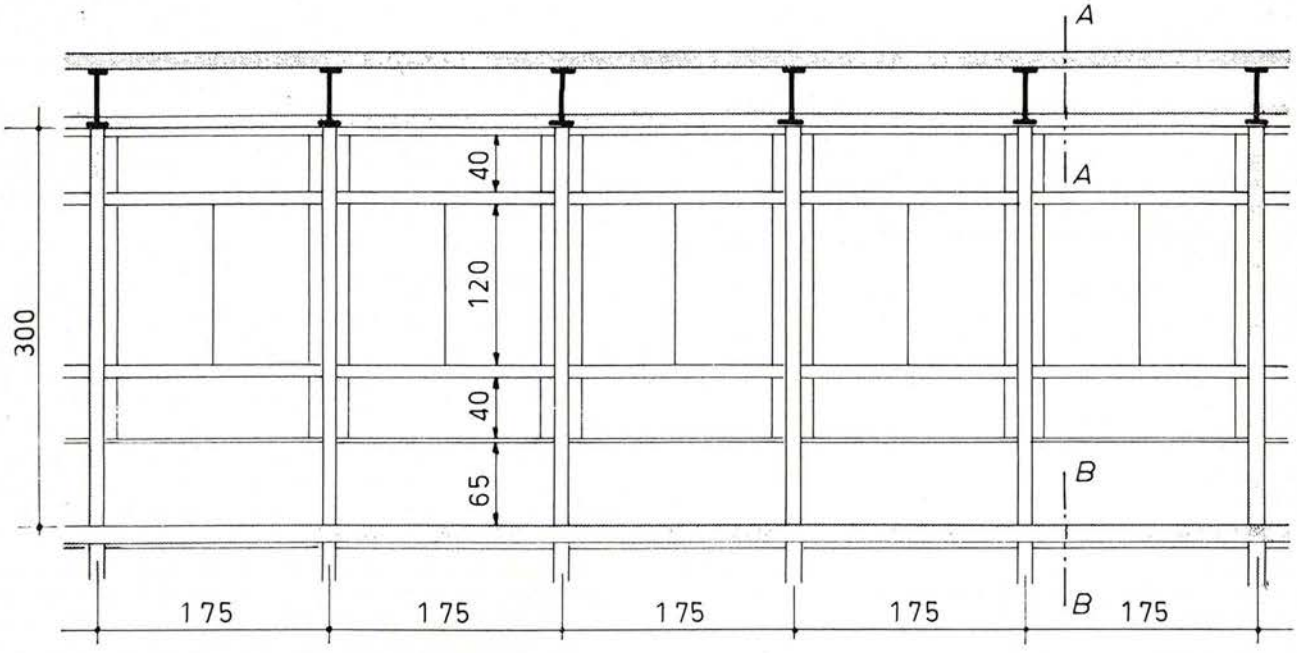
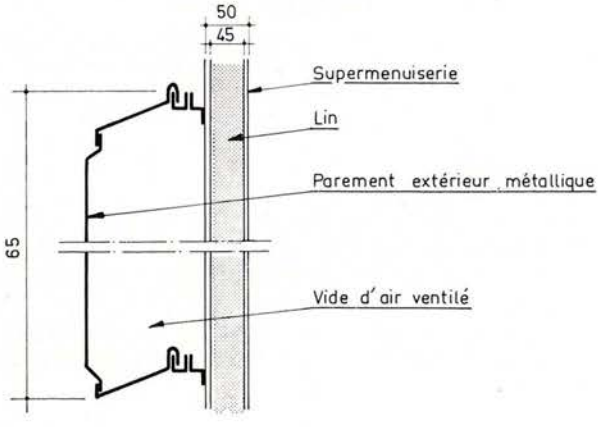


Figure 4

COUPE VERTICALE D'UN PANNEAU D'ALLEGE



2. Bâtiments d'inertie thermique moyenne, lycée D

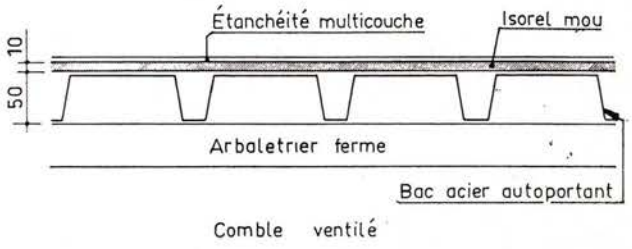
Le lycée D est aussi une construction métallique, mais qui diffère essentiellement de la précédente par la présence d'une dalle de béton constituant le plancher (fig. 4 et 5).

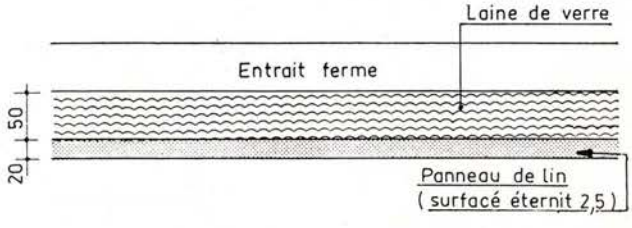
Il s'agit d'un bâtiment R + 1 d'exposition SO et NE.

Les surfaces des parois opaques et vitrées sont les mêmes que précédemment et, si leurs constitutions diffèrent quelque peu, les caractéristiques thermiques, excepté l'inertie, sont analogues, le coefficient K moyen de la façade étant aussi égal à 4. Les panneaux d'allège (fig. 7) sont formés d'un parement extérieur métallique (acier 12/10 mm) d'un vide d'air un peu ventilé, et d'un parement intérieur formé d'un panneau sandwich de 5 cm dont l'âme est en aggloméré d'anas de lin de 45 mm; leur coefficient K est de 1,35 kcal/m².h.°C.

LYCÉE D

COUPE AA : TOITURE





COUPE BB : PLANCHER

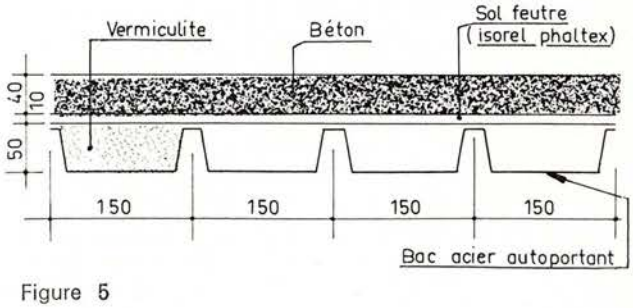
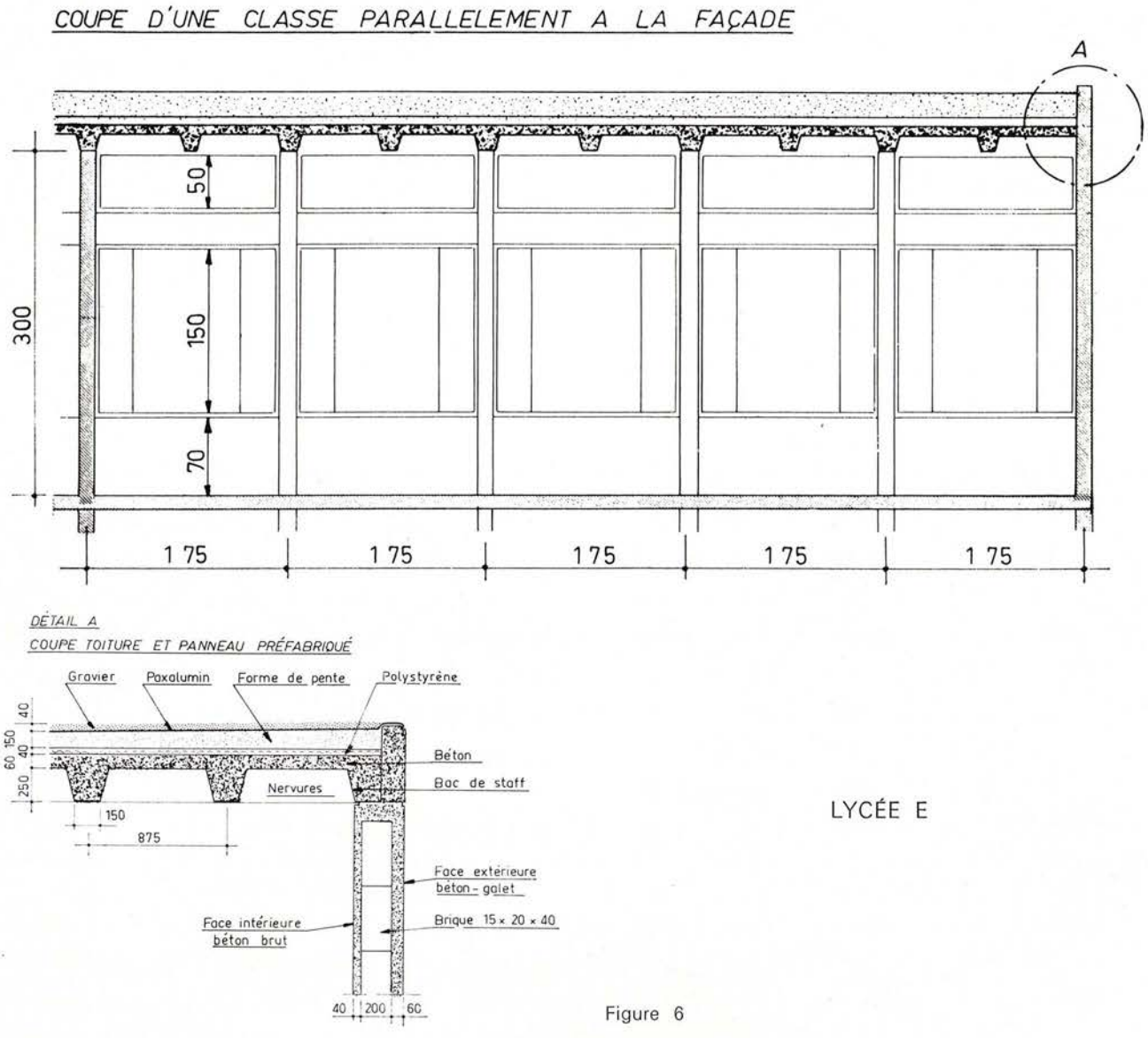


Figure 5



LYCÉE E

Figure 6

La *toiture* (fig. 5) a un coefficient K de 0,8 kcal/m².h.°C et comprend de bas en haut.

— 5 cm de laine de verre,
— un comble un peu ventilé,
— 10 mm d'Isorel recouvert d'une étanchéité multicouche.

Le *plancher* est ainsi fabriqué (fig. 5) : sur des bacs en acier formant coffrage perdu est coulée une dalle de 5 cm en béton de vermiculite ; puis, après interposition de 10 mm de feutre, est coulée une dalle de 4 cm en béton.

Les *fenêtres ouvrantes* sont coulissantes et au nombre de cinq, d'où une surface totale d'ouverture de 4,50 m².

Les *protections solaires* sont les mêmes qu'au lycée A : store de toile extérieur bleu foncé, projeté à l'italienne, de facteur solaire moyen 0,15.

Il existe des carreaux ouvrants sur le couloir, mais ils sont très peu utilisés.

3. Bâtiments de forte inertie thermique, lycée E

Le lycée E comporte plusieurs bâtiments à rez-de-chaussée comprenant quatre classes, c'est-à-dire deux classes sur chaque façade, chaque classe ayant donc un mur en pignon.

L'exposition de ces bâtiments est ENE et OSO.

Les surfaces et coefficients de transmission thermique des parois sont voisins de ceux des deux lycées précédents. Mais le poids de ces parois lourdes amortit considérablement les ondes de chaleur extérieures. La face intérieure de ces parois est pratiquement à température constante ; elle absorbe des calories pendant le jour et en rejette pendant la nuit.

Les *murs extérieurs* des façades et des pignons sont faits de panneaux préfabriqués lourds, constitués de l'extérieur vers l'intérieur par (fig. 6) :

— 6 cm de béton avec galets apparents à l'extérieur,
— 20 cm de briques creuses,
— 4 cm de béton à l'intérieur.

Le coefficient K de cet ensemble est 1,65 kcal/m².h.°C.

La *toiture* pèse 300 kg/m² et, à un coefficient K de 0,8 kcal/m².h.°C, elle est constituée ainsi. Au-dessus des bacs en staff nervurés on a :

— 6 cm de béton,

— 3 cm de polystyrène,

— une forme de pente en béton d'une épaisseur variant entre 10 et 15 cm.

— une étanchéité recouverte de gravier.

Ces murs et cette toiture lourde amortissent l'onde de température extérieure (température équivalente au soleil). En supposant que la température de l'air intérieur est constante, ce qui est à peu près le cas, et en décomposant en série de Fourier, on montre que l'onde fondamentale de température extérieure est, sur la face intérieure de la paroi, amortie suivant un coefficient μ égal à 0,08 pour les murs et 0,05 pour la toiture.

Chaque classe comprend cinq *baies vitrées* en verre teinté absorbant (verre ombral), dont la partie centrale est fixe et qui comportent deux ouvrants latéraux. La surface totale des baies est, comme dans les autres lycées, de 13,50 m², celle des ouvertures étant de 4,50 m².

Derrière les vitres, est placé un store intérieur vertical coulissant en toile bleue. Le facteur solaire de l'ensemble verre teinté et store intérieur est de 0,42 (cf. Cahier 608 du CSTB).

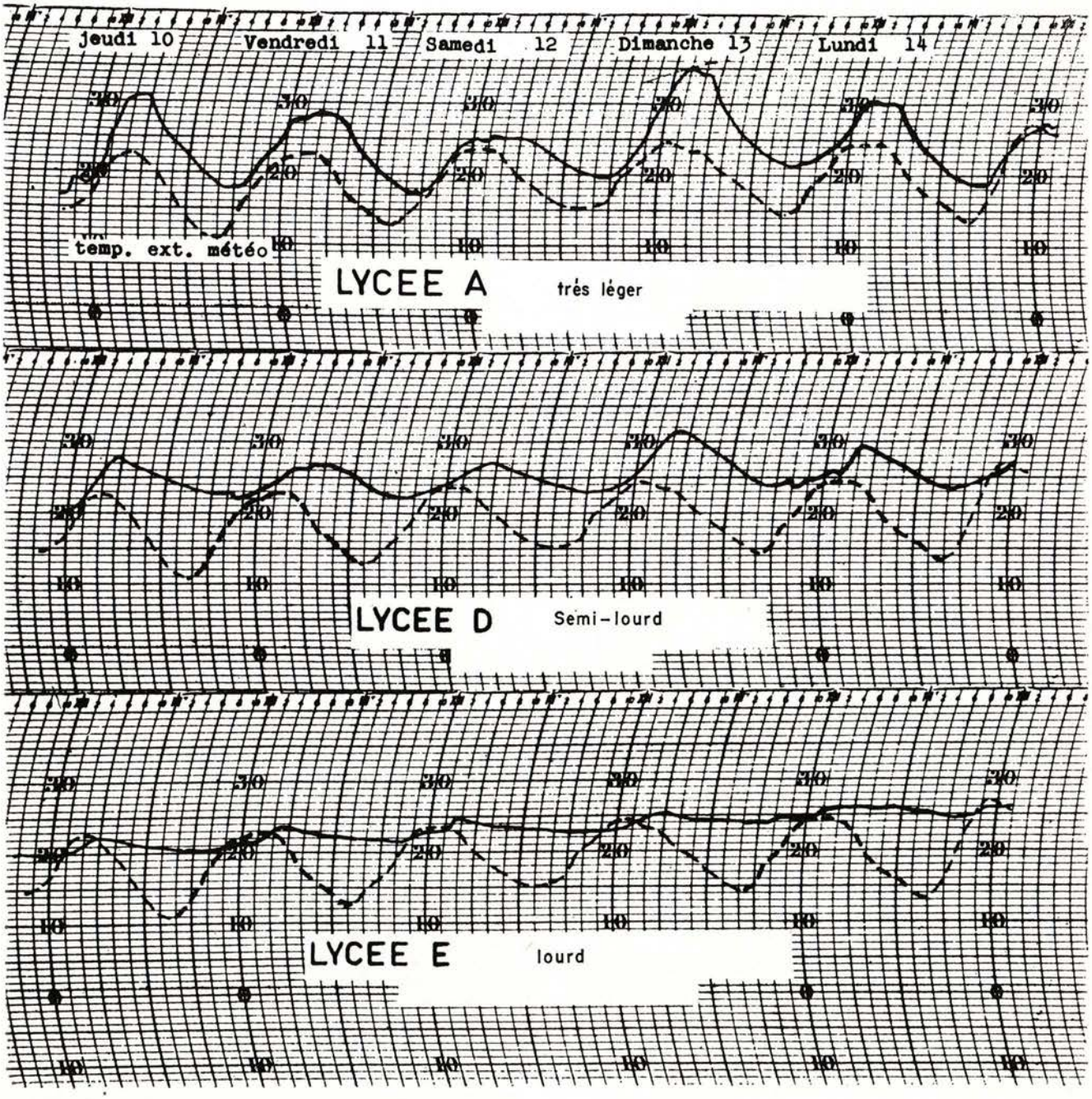


Figure 7

Comparaison entre les lycées A, D et E d'inertie différente (exposition voisine S.O à O-SO).

II. Étude expérimentale — Enregistrements de température à l'intérieur des classes

1. Comparaison entre les divers lycées

On a retenu la période du 10 au 15 juin, où l'on trouve plusieurs journées ensolleillées et où les classes sont occupées.

Les enregistrements de température à l'intérieur des lycées A, D et E sont donnés à la figure 7 où l'on a aussi indiqué la température extérieure sous abri donnée par la Station météorologique la plus proche.

Pendant ces journées, les conditions d'ensoleillement et d'occupation étaient les suivantes :

Dates	Temps	Classes
Jeudi 10 juin	couvert le matin ensoleillé l'après-midi	innoccupées
Vendredi 11	ensoleillé toute la journée	occupées
Samedi 12	ensoleillé le matin variable l'après-midi	en général occupées
Dimanche 13	ensoleillé toute la journée	innoccupées
Lundi 14	ensoleillé toute la journée	occupées
Mardi 15	très peu ensoleillé	en général occupées

Lorsque les classes sont occupées, les fenêtres sont ouvertes et les stores baissés ; par contre, les ouvertures sur le couloir demeurent fermées.

Les classes correspondant à ces enregistrements sont d'exposition voisine, entre le SO et l'OSO ; ce sont les classes où l'inconfort éventuel est le plus marqué, le maximum d'ensoleillement coïncidant avec le maximum de température sous abri.

La température intérieure est d'autant plus faible et ses oscillations plus réduites que l'inertie est plus grande.

Si l'on compare les bâtiments pendant une journée d'ensoleillement continu où les classes sont occupées, par exemple le vendredi 11 juin et le lundi 14, la différence entre les températures dans le lycée A très léger et le lycée E très inerte atteint 5 °C.

Les apports de chaleur dus au soleil sont pourtant plus élevés dans le lycée E (cf. III 3,2) que dans le lycée A, la protection des baies vitrées dans le lycée E étant médiocre (S = 0,42 verre teinté plus store intérieur).

Le lycée D d'inertie moyenne donne un résultat intermédiaire, à 2° au-dessous de la température dans le lycée A très léger, les apports solaires étant à peu près les mêmes dans ces deux lycées.

Dans le lycée E fortement inerte, la température intérieure est pratiquement constante. La classe est orientée à l'OSO et pendant les heures de cours, la température dans l'après-midi n'y est supérieure à celle du matin que d'environ 1°. Les brusques montées de température vers 16 heures correspondent à la fin des classes où l'on ferme les fenêtres et remonte les stores. Pendant les heures d'occupation, où les stores sont baissés et les fenêtres ouvertes, la température intérieure ne dépasse pas la température extérieure.

La classe du lycée A très léger a une exposition SO ; le vendredi 11 et le lundi 14, la température maximale y est de 6° supérieure à celle du maximum de température extérieure. Cette période n'a pas été très chaude puisque le maximum de température extérieure ne dépasse pas 25° ; avec une température supérieure et un ciel sans nuage, l'écart de 6° serait conservé. Avec une température d'air de 30°, possible à Paris et fréquente dans le Midi, la température intérieure serait de 36°, ce qui est très inconfortable. On verra au chapitre D le nombre de jours où il y a inconfort.

Des enregistrements dans les trois lycées très légers A, B, C, pour des classes d'exposition différentes, ont donné les résultats de la figure 8.

Au moment où les classes sont occupées (fenêtres ouvertes, stores baissés), *l'écart entre les maximums de températures intérieure et extérieure est le suivant :*

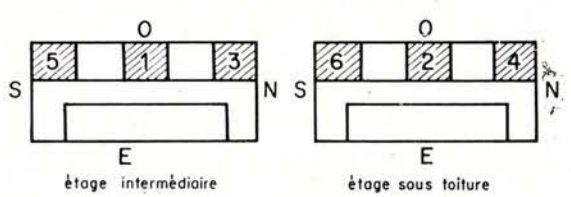
classe SE, lycée A : 4°,
classe S, lycée B : 4°5,
classe SO, lycée A : 6°,
classe O, lycée C : 6°.

2. Comparaison entre les classes de situation différentes (intermédiaires, sous-toiture, contre pignon) d'un lycée très léger (lycée C)

On a enregistré les températures à l'intérieur de six classes d'exposition Ouest d'un bâtiment R + 2 du lycée C.

La figure 9 donne les résultats obtenus dans ces six classes, pendant une période ensoleillée (15 et 16 septembre).

Les six classes d'exposition Ouest sont disposées comme l'indique le plan ci-dessous.



La classe 1, au premier étage, au centre, est intermédiaire et a, comme seule paroi extérieure, la façade. Les classes 3 et 5, aussi au premier étage, sont la première contre le pignon Nord, la deuxième contre le pignon Sud.

Les classes 2, 4, 6 au deuxième étage sont sous la toiture, la classe 2 au centre, les classes 4 et 6 contre les pignons Nord et Sud.

Toutes ces classes ont cinq travées, à l'exception de la classe 5 qui en a six.

Les classes étaient inoccupées, fenêtres fermées, stores relevés ; les suppléments de températures dus au soleil sont considérables : 18° en moyenne le 15 septembre, 14° le 16 septembre.

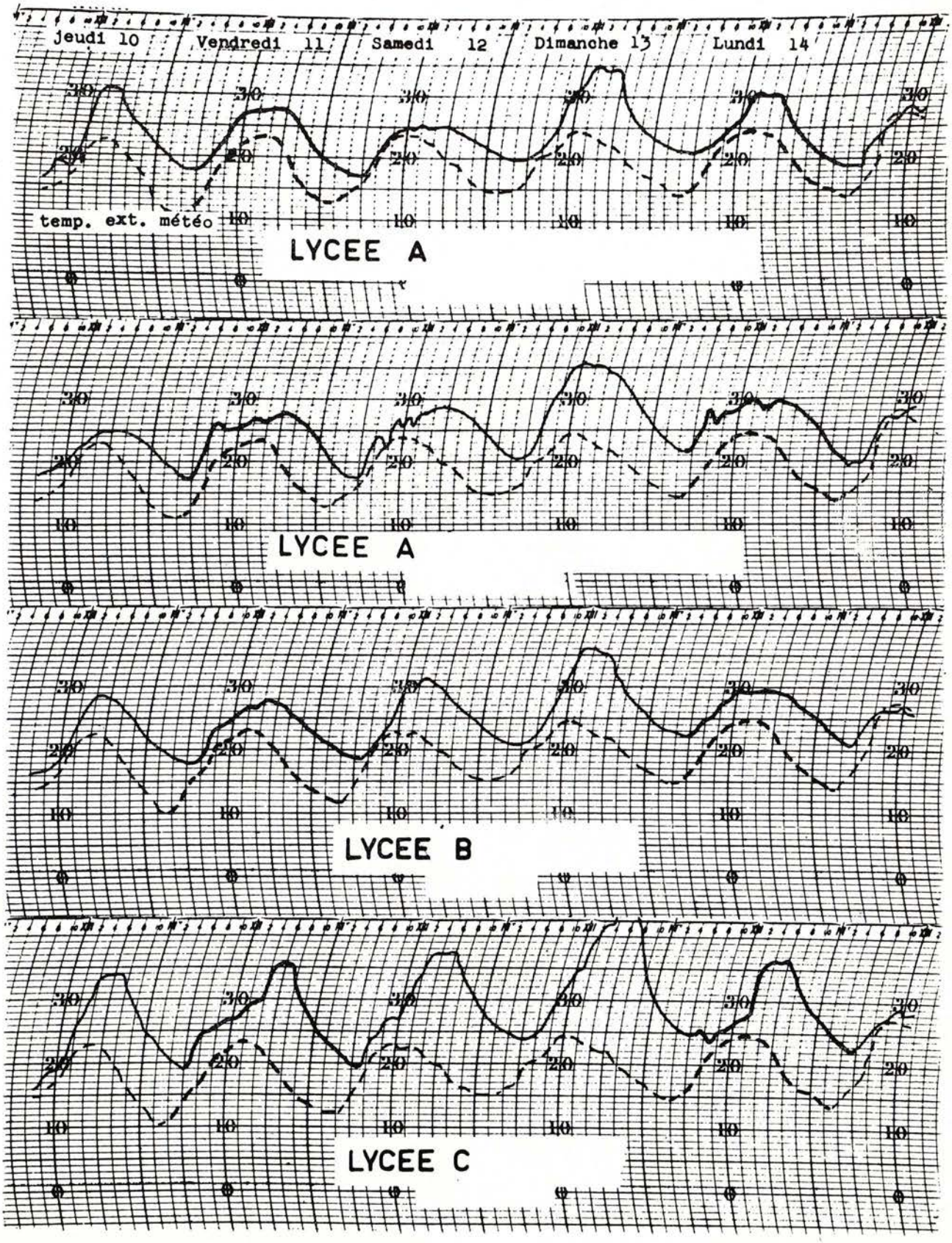


Figure 8

Comparaison entre les lycées A, B et C d'inertie légère et exposition différente.

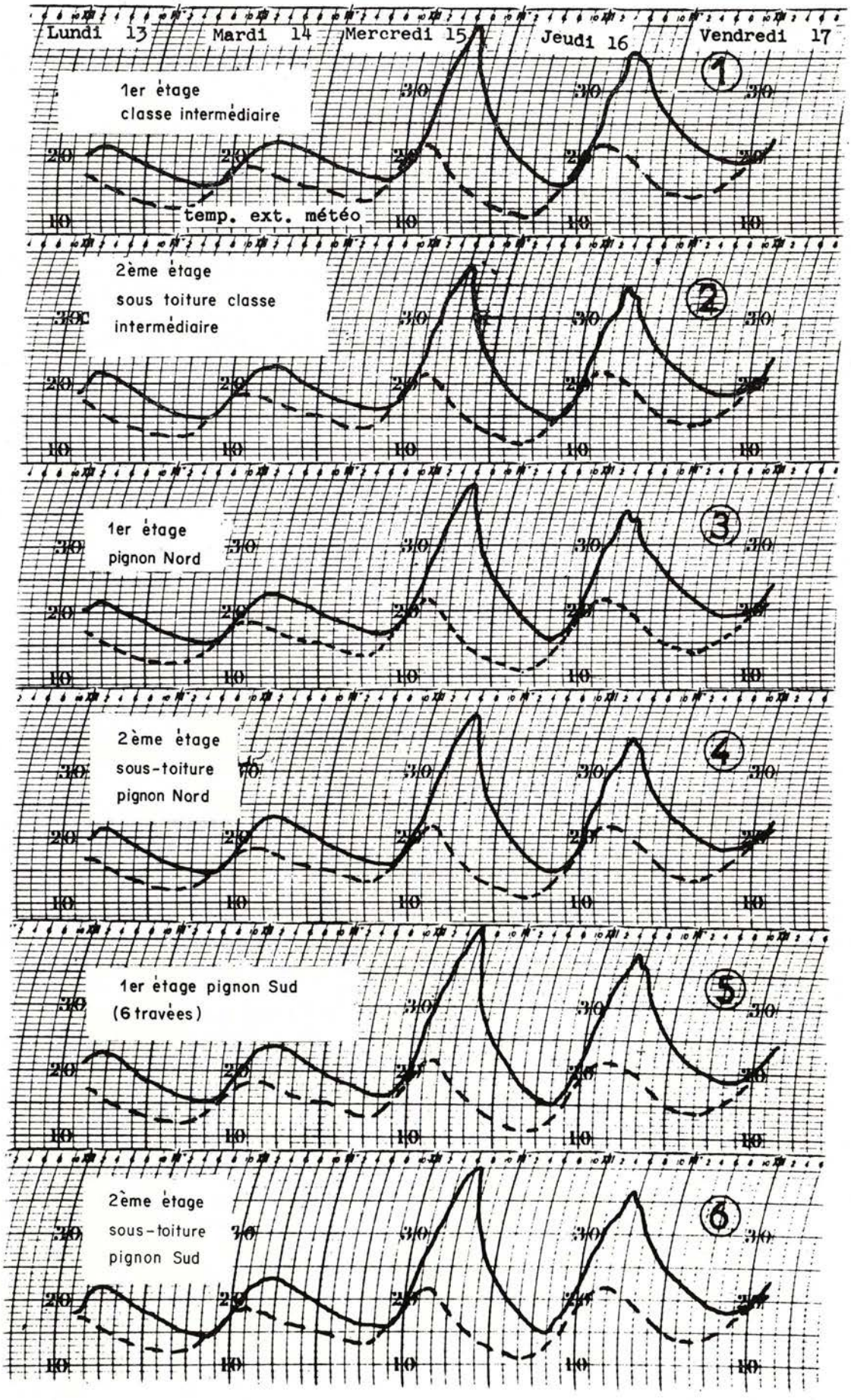


Figure 9

Comparaison entre les classes de situation différente d'un lycée très léger (lycée C façade Ouest).

On obtient, à 1° près, dans toutes les classes la même température que dans la classe intermédiaire n° 1. On peut en déduire, et le calcul vérifiera cette conclusion, que si les classes étaient occupées avec les fenêtres ouvertes et les stores baissés, on retrouverait les 6° de plus que la température extérieure trouvés plus haut avec des écarts entre chaque classe n'atteignant pas 1°. *On peut dire que les conditions intérieures sont les mêmes quelle que soit la position de la classe.*

Ceci est dû au bon isolement de la toiture (K = 0,8), et surtout au fait que, dans ces écoles très légères, ce sont les apports instantanés qui comptent. Or les apports solaires par les pignons sont nuls quand les apports par les baies sont maximaux. De même, au moment du maximum d'ensoleillement de la façade Ouest, le soleil est bas sur l'horizon (hauteur de 30 à 40°) et la toiture reçoit un ensoleillement faible.

Par contre, s'il s'agissait d'une façade Sud, pour laquelle le maximum d'ensoleillement coïncide avec celui de la toiture, le cas serait plus défavorable, mais la bonne isolation de la toiture limite à 1,5° le supplément de température correspondant (cf. III, 2).

III. Calculs — Comparaison avec les enregistrements

1. Données climatiques prises en compte dans les calculs

a) La température extérieure de référence est la température de l'air sous abri dans un endroit dégagé; c'est celle que mesurent les stations météorologiques, nous l'appellerons *température extérieure météo* ($T_{E\ météo}$). Cette température est celle de l'air devant une façade à l'ombre.

Par contre, devant une façade légère échauffée par le soleil, la température de l'air peut être nettement supérieure à cette température météo. C'est le cas des lycées A, B, C et D.

Au lycée A, pour une classe Sud-Est située au premier étage et donnant sur une cour goudronnée, on a mesuré les écarts suivants au moment du maximum d'ensoleillement et pour un vent de 2 m/s normal à la façade :

— à 3 cm de la façade, 6° de plus que la $T_{E\ météo}$.

— à 1 m de la façade, 1° de plus que la $T_{E\ météo}$.

Les bâtiments du lycée A sont assez espacés sur un plateau bien dégagé. Avec des bâtiments plus serrés et dans un endroit plus encaissé, on pourrait avoir des écarts plus grands, dans les mêmes conditions de vent extérieur.

Les enregistrements de température présentés plus haut (fig. 7) ont été faits à une période où les conditions de température et d'ensoleillement étaient assez régulières d'un jour à l'autre.

La température extérieure météo a, les 12, 13 et 14 juin, oscillé chaque jour, à un degré près, de 15° à 24°.

Le calcul a été fait pour une température extérieure météo périodique oscillant de 15° à 24°.

b) On a pris *l'ensoleillement direct* défini par les courbes de la figure 10, qui donnent le rayonnement solaire direct tombant, au mois de juin, sur une façade verticale suivant l'orientation de celle-ci. Ces courbes sont tirées des données de base d'ensoleillement (cf. cahier 608), très voisines de l'ensoleillement qui a régné pendant les observations, d'après les enregistrements de l'observatoire de Saint-Maur.

A cet ensoleillement direct, il convient d'ajouter le rayonnement solaire diffusé par le ciel (40 à 60 kcal/m².h) et le rayonnement solaire diffusé par le sol devant la façade (40 à 90 kcal/m².h pour les sols courants : terre battue, gazon, cours goudronnées ou bétonnées).

Comme valeur maximale du rayonnement total tombant sur une façade verticale en juin, nous prendrons :

— 600 kcal/m².h pour les expositions E et O,

— 550 kcal/m².h pour les expositions SO et SE,

— 450 kcal/m².h pour l'exposition S.

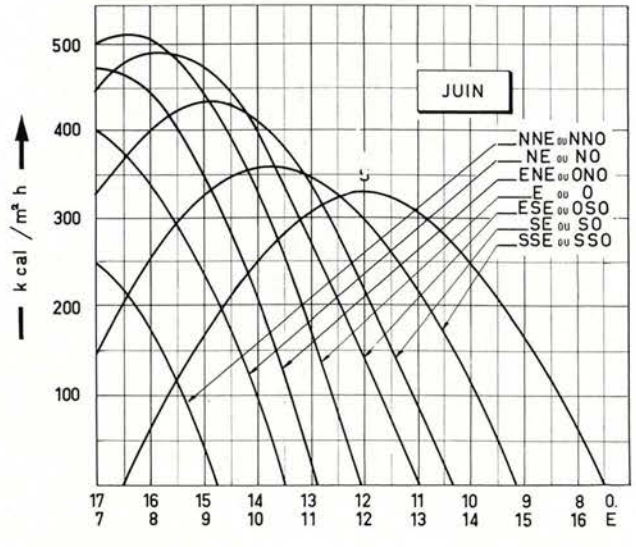


Figure 10

2. Bâtiments d'inertie thermique négligeable (Lycées A, B ou C)

La masse thermique utile d'une classe, c'est-à-dire la masse en contact avec l'air de la pièce, se réduit à peu près à :

— 1,5 t de métal (planchers, murs, cloison sur le couloir),

— 400 kg de Placoplâtre en 1 cm d'épaisseur (cloisons entre classes),

— 300 kg de bois (table, siège).

Les matériaux isolants (Isorel isolant, laine de verre) ont une capacité calorifique négligeable. Le bois absorbe très peu. Le métal et le Placoplâtre en faible épaisseur se mettent très vite en régime. Comme, au moment du maximum de température intérieure, on a un palier d'environ 2 heures où la température reste constante à un demi-degré près (cf. fig. 7), la faible masse thermique de la classe, très vite saturée (moins d'une demi-heure), n'est à peu près d'aucun secours pour diminuer la valeur de ce maximum.

Pratiquement la seule manière de lutter contre les apports de chaleur est donc de *ventiler* le plus

possible la classe par l'air extérieur. Pendant la période des enregistrements (10 au 15 juin), les portes sur le couloir sont demeurées fermées et la ventilation s'est faite sur la façade ensoleillée par les châssis ouvrants.

En considérant tout d'abord le cas d'une *classe intermédiaire* (c'est-à-dire qui n'est située ni sous toiture ni en pignon), le calcul de la ventilation nécessaire s'effectue au moyen de la relation :

(1)

$$\Phi_{\text{élèves}} + \Phi_{s\ \text{vitres}} + \Phi_{s\ \text{mur}} = \varphi_{t\ \text{façade}} + \varphi_{t\ \text{cloison}} + \Phi_{\text{vent}}$$

dans laquelle :

$\Phi_{\text{élèves}}$ représente la chaleur dégagée par les élèves

$\Phi_{s\ \text{vitres}}$ les apports dus au soleil à travers les baies vitrées

$\Phi_{s\ \text{mur}}$ les apports dus au soleil à travers les parois opaques

$\varphi_{t\ \text{façade}}$ les pertes de chaleur à travers la façade

$\varphi_{t\ \text{cloison}}$ les pertes de chaleur à travers la cloison séparant la classe du couloir

Φ_{vent} le flux de chaleur évacué par la ventilation.

Examinons ces différents termes :

a) *La chaleur dégagée par les élèves* est de 50 kcal/h par élève soit, pour 30 élèves :

$$\Phi_{\text{élèves}} = 1500 \text{ kcal/h}$$

b) *Les apports dus au soleil au travers des baies vitrées* sont donnés par :

$$\Phi_{s\ \text{vitre}} = s_{vi}.\ \text{S.R}$$

s_{vi} : surface des vitres (13,5 m²),

S : facteur solaire (0,15),

R : rayonnement solaire total tombant sur la façade.

En juin, les apports maximaux ont pour valeurs :

— façades E et O :

s_{vi} . S.R = 13,5 × 0,15 × 600 = 1200 kcal/h

— façades SE et SO :

s_{vi} . S.R = 13,5 × 0,15 × 550 = 1100 kcal/h

— façades S :

s_{vi} . S.R = 13,5 × 0,15 × 450 = 900 kcal/h

c) *Les apports dus au soleil au travers des parois opaques* sont donnés par :

$$\Phi_{s\ \text{mur}} = \text{K}_{ms} . s_{ms} . \frac{\alpha\ \text{R}}{h_e}$$

s_{ms} : surfaces des parois ensoleillées. Les parois opaques de la façade ont une surface totale de 12,75 m² d'un coefficient K moyen de 2,9; elles sont ensoleillées à l'exclusion de l'encadrement des baies (2 m² de K = 5) qu'abritent les stores. On a donc :

$$s_{ms} = 12{,}75 - 2 = 10{,}75 \text{ m}^2$$

K_{ms} : coefficient de transmission thermique moyen des parois opaques ensoleillées :

$$\text{K}_{ms} = \frac{12{,}75 \times 2{,}9 - 2 \times 5}{10{,}75} = 2{,}5$$

α : coefficient d'absorption solaire de la surface extérieure de la paroi, qui est de couleur grise plus ou moins sale après un certain temps d'usage.

$$\alpha = 0{,}75$$

h_e : coefficient superficiel extérieur. $h_e = 15$.

R : rayonnement solaire tombant sur la façade.

En juin, les apports maximaux dus au soleil au travers des parois opaques sont donc :

— façade Est ou Ouest :

$$\Phi_{s\ \text{mur}} = 800 \text{ kcal/h}$$

— façade Sud-Ouest ou Sud-Est :

$$\Phi_{s\ \text{mur}} = 750 \text{ kcal/h}$$

— façade Sud :

$$\Phi_{s\ \text{mur}} = 600 \text{ kcal/h}$$

La température de l'air intérieur t_i, sous l'action de ces apports que ne peut absorber aucune inertie, devient supérieure à la température de l'air devant la façade t'_e et à celle dans le couloir t'_i. Il en résulte une perte de chaleur à travers la façade et la cloison donnant sur le couloir, ces pertes s'ajoutant à celles dues à la ventilation. Par contre, il n'y a pas d'échange avec les classes voisines qui sont à la même température.

d) *Pertes au travers de la façade.*

$$\varphi_{t\ \text{façade}} = \text{S}_f . \text{K}_{f\ \text{moy}}\ (\text{t}_i - t'_e)$$

Surface $\text{S}_f = 26$ m² $\quad \text{K}_{f\ \text{moyen}} = 4$

t'_e température de l'air devant la façade; on prendra :

$$t'_e = \text{T}_{\text{E météo}} + 1^{\text{o}}$$

e) *Pertes au travers de la cloison qui sépare la classe du couloir*

$$\varphi_{t\ \text{cloison}} = \text{S}_{cl} . \text{K}_{cl} . (t_i - t'_i)$$

S_{cl} : surface de la cloison (26,2 m²),

K_{cl} : coefficient de transmission de la cloison (3,2 kcal/m².h.°C),

t'_i : température dans le couloir. Mesurée pendant les expériences, elle est égale à

$$\frac{\text{t}_i + \text{T}_{\text{E météo}}}{2}.$$

Cela donne :

$$\varphi_{t\ \text{cloison}} = 83{,}5 \left(t_i - \frac{t_i + \text{T}_{\text{E météo}}}{2} \right) = 41\ (t_i - \text{T}_{\text{E météo}})$$

f) *Le flux de chaleur évacué par la ventilation* est donné par :

$$\Phi_{\text{vent}} = 0{,}3\ \text{N} . \text{V}\ (\text{t}_i - t'_e)$$

t_i : température intérieure de la classe,

0,3 : chaleur volumique de l'air en kcal/m³.°C,

N : nombre de renouvellements d'air par heure,

V : volume de la classe (180 m³).

L'air de renouvellement est un mélange d'air chaud montant le long de la façade et d'air amené par le vent. Suivant les conditions de vent extérieur, la température de l'air de renouvellement t'_e est à 1° ou 2° au-dessus de la température météo.

En prenant $t'_e = T_{E\ météo} + 1°$ qui correspond à peu près aux conditions dans lesquelles se sont faits les enregistrements de la figure 10 dans le lycée A, on a :

$$\Phi_{vent} = 54 . N \left[t_i - (T_{E\ météo} + 1) \right]$$

Pour une façade SO, comme celle du lycée A, la relation (1) s'écrit :

$$N . 54\ (t_i - T_{E\ météo} - 1) + 104\ (t_i - T_{E\ météo} - 1) + 41\ (t_i - T_{E\ météo}) = 1\,500 + 1\,200 + 800$$

Or, on a observé que $t_i - T_{E\ météo} = 6°$.

Dans ces conditions, le calcul donne :

$$N = \frac{2\,734}{5 \times 54} = 10$$

Ce renouvellement d'air de 10 volumes par heure a été confirmé approximativement en mesurant, au moyen d'anémomètres à fil chaud, les vitesses d'entrée et de sortie de l'air à travers les orifices de ventilation.

Compte tenu des sections des ouvertures, ce chiffre correspond à un vent moyen de 3 à 4 m/s que l'on avait effectivement pendant les observations. Pour un vent faible (2 m/s), il faudrait prendre N = 7 ce qui majorerait d'environ 1,5° la température intérieure.

Pour les autres expositions Ouest, Sud, en prenant un renouvellement d'air de 10 volumes par heure, on retrouve les résultats expérimentaux (fig. 7 et 8) :

$t_i - T_{E\ météo} = 6°$ à 16 heures pour une classe exposée à l'Ouest.

$t_i - T_{E\ météo} = 5°5$ à midi pour une classe exposée au Sud.

En tenant compte du décalage entre le moment du maximum de température extérieure et celui du maximum d'ensoleillement pour chaque exposition, on trouve comme écart entre les maximums de température intérieure et extérieure, 6° à l'Ouest et 4° au Sud. Ces résultats sont ceux observés dans les lycées B et C (fig. 8).

Ces valeurs concernent, on s'en souvient, les classes intermédiaires, c'est-à-dire celles qui ne sont situées ni sous-toiture ni en pignon.

L'influence d'un pignon est un peu favorable ; en effet, au moment du maximum d'apports solaires le soleil est en face de la façade et le pignon est à l'ombre. Le bâtiment n'ayant aucune « mémoire », seuls comptent les échanges instantanés ; au moment du maximum d'ensoleillement, il faut ajouter un flux sortant,

$$\varphi_{pignon} = K_{pignon} \times S_{pignon}\ (t_i - T_{E\ météo})$$
$$K_{pignon} = 1,9$$
$$S_{pignon} = 21\ m^2$$
$$\varphi_{pignon} = 40\ (t_i - T_{E\ météo}).$$

Le calcul montre qu'il en résulte un abaissement de moins d'un demi-degré sur les températures intérieures que nous venons d'indiquer. Cela confirme l'expérience.

L'influence de la toiture est défavorable, surtout pour une exposition Sud. Dans ce cas, en effet, c'est au moment du maximum d'ensoleillement de la façade que la toiture reçoit l'ensoleillement le plus fort (environ 740 kcal/m².h au mois de juin) le soleil étant haut sur l'horizon.

Au travers de la toiture, on a alors :

$$\Phi_{Toit} = K_{Toit} \times S_{Toit} \left(\frac{\alpha R}{h_e} + T_{E\ météo} - t_i \right)$$
$$K_{Toit} = 0,7 \qquad \alpha = 0,7$$
$$S_{Toit} = 61\ m^2 \qquad R = 740\ kcal/m^2.h$$
$$h_e = 17$$

d'où 1,7° de plus que dans une classe intermédiaire.

Au moment du maximum de température intérieure, vers 14 h, le soleil est un peu plus bas et le supplément est alors de 1,5°.

Au moment du maximum de température intérieure dans une classe exposée à l'Est ou à l'Ouest la toiture reçoit un ensoleillement beaucoup plus faible (environ 300 kcal/m².h au mois de juin). La majoration de température intérieure correspondante est de l'ordre d'un demi-degré.

Conclusion :

Sur une exposition Ouest, la température intérieure maximale est donc à peu près indépendante de la situation de la classe dans le bâtiment; c'est ce qu'ont montré les enregistrements (§ 11,2). *L'écart entre les maximums de température intérieure et extérieure est donc de 6° pour toutes les classes exposées à l'Ouest.*

Au Sud, dans une classe intermédiaire, cet écart est de 4°; dans une classe sous toiture, il est majoré de 1,5° du fait des apports par la toiture. Les classes sous toitures au Sud sont donc aussi chaudes que les classes à l'Ouest.

3. Bâtiments d'inertie thermique non négligeable

L'élévation de la température intérieure due à un apport de chaleur n'est plus instantanée. Le calcul de la température est plus complexe car il faut tenir compte du rôle de volant thermique des différentes parois lourdes. Dans le cahier 608 du CSTB (p. 26 à 39) on trouvera une méthode de calcul de l'influence des parois inertes sur la température intérieure d'un local. Nous avons utilisé cette méthode de calcul et effectué quelques mesures par analogie électrique.

3,1. Lycée semi-lourd, lycée D

Le plancher est constitué d'une dalle flottante en béton de 4 cm reposant sur un support en béton de Vermiculite de 5 cm par l'intermédiaire d'un Isorel isolant.

On admettra qu'aucun flux de chaleur ne passe de la dalle flottante au support, ce qui est à peu près vrai ; en effet l'Isorel isolant de 1 cm d'épaisseur assure une isolation thermique, telle que le flux qui le traverse peut être ici considéré comme nul.

Dans ces conditions l'absorption par la surface supérieure du plancher est la même que si le plancher était constitué par une simple dalle de 8 cm d'épaisseur (2 × 4) en béton lourd. D'où, pour $h_i = 8$ un flux absorbé maximal de 4,6 kcal/m².h par degré d'amplitude de la température intérieure t_i (cf. fig. 10 du Cahier 608, p. 27).

A la partie inférieure, l'absorption est la même que pour une dalle de béton de vermiculite de 10 cm d'épaisseur. D'où pour $h_i = 8$ un flux absorbé maximal de 2,4 kcal/m².h par degré d'amplitude de la température intérieure t_i (cf. abaque p. 57 du Cahier 608).

La surface du plancher étant de 61 m² le flux absorbé maximal est pratiquement

$$\Phi_{\text{plancher}} = 61 \times (4{,}6 + 2{,}4)\ E_i = 427\ E_i$$

où E_i est la demi-amplitude de l'onde de température intérieure. La façade légère est analogue à celle des lycées très légers A, B et C et les échanges dus au soleil comme ceux dus aux écarts de température sont à peu près les mêmes que ceux calculés au paragraphe précédent.

On se reportera à l'annexe I pour le calcul, qui est assez complexe et pour lequel on a utilisé une méthode approchée étayée par quelques calculs assez rigoureux en analogie électrique.

Avec un renouvellement d'air de 10 volumes par heure, le calcul donne un écart entre les températures maximales extérieures et intérieures d'environ 4°. Cela correspond bien à l'enregistrement du 11 juin (fig. 7).

3,2. Lycée lourd, lycée E

Les apports solaires par les baies vitrées sont beaucoup plus importants que dans les lycées précédents, la protection, faite d'un verre teinté et d'un store intérieur, étant médiocre (S = 0,42).

On a, à l'OSO, au moment du maximum d'ensoleillement

$$\Phi_{s\ \text{vitre}} = s_{vi} \cdot S \cdot R = 3000\ \text{kcal/h}$$

$s_{vi} = 13{,}5$ m² surface des vitres ;
S = 0,42 facteur solaire ;
R = 600 kcal/m².h.

A ces apports et à ceux dus au soleil, il faut ajouter les apports par la toiture et par les pignons ensoleillés, évidemment très amortis.

Le calcul, assez complexe, donne une température intérieure maximale égale à la température maximale extérieure. Cela correspond à nos enregistrements.

C. Influence sur le confort thermique, pendant le mois de juin à Paris, de certains aménagements applicables aux constructions scolaires très légères

Seuls sont étudiés ici les aménagements susceptibles d'améliorer le confort thermique des constructions scolaires légères sans altérer leur caractère propre, c'est-à-dire sans en faire des constructions lourdes.

Pour abaisser la température intérieure on peut diminuer les apports en améliorant la protection solaire, augmenter les déperditions par une ventilation mécanique très importante ou introduire de l'inertie pour amortir l'influence des apports de chaleur. On peut aussi refroidir l'air de ventilation, ce qui n'est envisageable économiquement qu'avec un refroidissement par évaporation d'eau dans l'air.

On a calculé l'influence de ces modifications et on en a fait une vérification expérimentale partielle. Les données climatiques servant au calcul ont été modifiées par rapport à celles prises précédemment, pour les raisons suivantes.

La température extérieure météo pendant nos enregistrements était assez basse (température maximale 25°) et l'amplitude de ses variations était moyenne (de l'ordre de 8 à 10°). Or on rencontre à Paris, même en excluant les mois de juillet et août, des séquences chaudes où la température extérieure météo atteint des valeurs supérieures à 25° et où l'amplitude excède 10°. Reprenant la définition de la séquence chaude de base donnée dans le Cahier n° 608 du CSTB, on a adopté une onde de température extérieure météo variant de 14° à 26° (amplitude 12°).

Pour l'ensoleillement, on a conservé les chiffres précédents.

On verra au chapitre D comment ces résultats relatifs à des établissements de la région parisienne peuvent être étendus à d'autres lieux ; le calcul sera fait pour la région méditerranéenne. On verra également quelles sont les fréquences des températures atteintes en moyenne au cours des mois les plus chauds de l'année scolaire.

I. Diminution des apports solaires

Il n'est évidemment pas possible de diminuer la chaleur dégagée par les élèves. Les classes sont normalement prévues pour 30 élèves qui dégagent une chaleur sensible de 1 500 kcal/h (50 kcal/h pour un adolescent). *On ne peut diminuer que les apports solaires.*

1. Apports solaires par les baies vitrées

On a vu que le flux de chaleur correspondant s'écrit :

$$\Phi_s \text{ vitre} = s_{vi} \times S \times R$$

s_{vi} : surface des vitres,
S : facteur solaire,
R : rayonnement solaire total tombant sur un mètre carré de façade.

Examinons chacun de ces facteurs et sa diminution possible.

Rayonnement solaire total (R)

La figure 10 montre qu'au moins de juin, à la latitude de Paris, l'exposition Sud-Nord (c'est-à-dire celle d'un bâtiment dont les principales façades sont exposées l'une au Sud, l'autre au Nord), reçoit un rayonnement total plus faible que les autres expositions.

Au mois de septembre, le soleil est plus bas sur l'horizon et la façade Sud reçoit alors à peu près le même ensoleillement que les façades Est et Ouest (cf. annexe II). Mais pendant le mois de juin, le plus chaud de l'année scolaire, l'exposition Sud-Nord permet de réduire les apports solaires ; elle permet aussi de décaler légèrement les heures du maximum de température extérieure météo (16 h) et du maximum d'ensoleillement (12 h) alors qu'à l'Ouest ces deux maximums ont lieu au même moment (16 h).

On verra plus loin *les conséquences de l'exposition* sur la température intérieure.

Surface des vitres s_{vi}

Dans les classes normales à 5 travées de 1,75 m, on a $s_{vi} = 13{,}5$ m² pour une surface de plancher $s_p = 61$ m², ce qui fait un rapport :

$$\frac{s_{vi}}{s_p} = \frac{1}{4{,}5}$$

Sans que l'éclairage devienne insuffisant, il semble que l'on puisse descendre à un rapport :

$$\frac{s_{vi}}{s_p} = \frac{1}{6}, \text{ soit } s_v = 10 \text{ m}^2$$

ce qui fait une diminution de 25 % sur s_{vi} et donc sur les apports correspondants.

Facteur solaire S

Les facteurs solaires des dispositifs courants de protection ont été étudiés et définis dans les Cahiers 437 et 608 du CSTB

Les bâtiments des lycées A, B, C et D sont le plus souvent équipés de stores extérieurs de toile bleu sombre projetés à l'italienne. Lorsque de tels stores arrêtent complètement le rayonnement solaire direct le facteur solaire est de 0,12 sur une façade Ouest et de 0,21 sur une façade Sud. En fait, le rayonnement direct pénètre en partie par les vitres : d'une part, les stores ne descendent pas assez bas et n'arrêtent complètement le soleil que pour une hauteur de 45°, alors qu'à l'Ouest le soleil, en face de la façade, est à une hauteur de 35° ; d'autre part, les jours de 25 cm entre deux stores consécutifs laissent entrer le soleil quand il n'est pas en face de la façade.

Pour les expositions SO qui ont été expérimentées, on a tablé sur un facteur solaire S de 0,15. A l'Ouest, ce facteur solaire S serait d'environ 0,20, une partie du rayonnement direct passant sous le store au moment du maximum d'ensoleillement.

Pour améliorer l'efficacité de ce store et pouvoir obtenir un facteur solaire compris entre 0,12 et 0,15 quelle que soit l'exposition, il faut faire les modifications suivantes :

— faire descendre le store plus bas, de façon à arrêter tous les rayons de soleil de hauteur supérieure à 30°,

— rapprocher le store de la façade pour que le soleil passant par les jours frappe essentiellement les surfaces opaques des ossatures, ou avoir des stores plus larges que les vitrages.

Ces modifications présentent évidemment l'inconvénient de gêner la ventilation naturelle.

Signalons que ces stores de toile doivent être conçus pour fonctionner facilement et sûrement. On voit trop souvent des stores de toile devenus inutilisables, le résultat sur le confort est alors catastrophique puisque les apports solaires par les baies sont presque décuplés. Pour éviter cela, il y a surtout lieu de soigner la rigidité des armatures des stores et de prévoir un système de fixation des bras en projection à l'italienne afin d'éviter le ballottement au vent.

Avec ces stores de toile sombre, l'éclairage devient médiocre dès que le soleil se cache derrière un nuage, d'où des manœuvres répétées. Or, des toiles de couleur claire, translucides, meilleures du point de vue de l'éclairage, ne donneraient pas une protection thermique suffisante.

On peut facilement doser l'éclairage de la classe avec des *stores à lames horizontales orientables* qu'il est inutile de projeter à l'italienne et qui assurent une très bonne protection solaire. Quelle que soit l'exposition, le facteur solaire est de 0,10 ou de 0,15 suivant que les lames sont verticales ou inclinées à 45°. Avec des lames suffisamment rigides et des rails latéraux les risques de détérioration sont faibles.

Des *pare-soleil horizontaux* fixes équipent un bâtiment du lycée A ; de telles protections ne conviennent que pour une *exposition voisine du Sud* (du SSO au SSE cf. cahier 608). Ce sont évidemment des protections très robustes sans mécanisme, donc sans risque de panne.

La portée à prévoir est de 0,7 fois la hauteur de la baie en plein Sud et de 1 fois la hauteur de la baie au SSO et au SSE.

Pour éviter l'éblouissement pendant l'hiver et la demi-saison, où le soleil, bas sur l'horizon, n'est pas arrêté par le pare-soleil, il est nécessaire de prévoir un store intérieur. Avec un store intérieur en toile un peu translucide, le facteur solaire est de 0,15 au mois de juin.

Notons que ces pare-soleil fixes diminuent l'éclairage naturel en hiver. La réduction de la surface des baies vitrées de 13,5 m² à 10 m² n'est plus alors admissible.

2. Apports solaires par les parois opaques

Ils sont donnés par :

$$\Phi_{s \text{ mur}} = s_{ms} \cdot \frac{K_{ms} \cdot \alpha}{h_e} \cdot R$$

On a vu comment R dépendait de l'exposition. La surface des parois s_{ms} est fixée par la surface des baies. On ne peut donc agir que sur le produit $K_{ms} . \alpha$.

K_{ms}, coefficient de transmission thermique moyen des parois ensoleillées, est fonction en grande partie des ponts thermiques (ossatures des panneaux et poteaux). Rappelons que l'on a actuellement :

pour le panneau seul $K = 1{,}4$ kcal/m² h .°C

pour les poteaux $K = 5$ kcal/m² h .°C

ce qui fait $K_{ms} = 2{,}5$ (B, III.2).

En corrigeant les ponts thermiques, il est possible sans trop de complication d'obtenir :

pour le panneau seul $K = 1$

pour les poteaux $K = 3$

ce qui fait $K_{ms} = 1{,}6$.

Cette amélioration du K_{ms} est également avantageuse pour l'hiver. α, coefficient d'absorption solaire de la paroi, est actuellement, pour les panneaux, d'environ 0,75. Une couleur claire ne donnerait une protection meilleure que pendant un certain temps. A moins de nettoyage fréquent, les panneaux se saliront et auront rapidement un coefficient voisin de 0,75.

Par contre, avec un écran placé parallèlement à la paroi à 20 ou 30 cm d'elle, l'espace intermédiaire étant largement ventilé sur l'air extérieur, on obtient un coefficient α de 0,20 immuable (cf. cahier 468).

Il faut noter que, pour une exposition voisine du Sud, un pare-soleil horizontal, destiné à protéger les vitrages, met à l'ombre l'allège pendant le mois de juin où le soleil est très haut sur l'horizon, les panneaux ne reçoivent plus alors que le rayonnement diffus du ciel et celui réfléchi par le sol, et l'on peut tabler sur un α équivalent de 0,30.

3. Bilan des réductions possibles des apports solaires

Sur le tableau I figure le bilan des apports solaires pour trois qualités croissantes *p, q, r* de la façade.

La qualité p *est moyenne* et correspond à peu près à la qualité actuelle, définie comme suit :

— surface des baies $s_{vi} = 13{,}5$ m²

— facteur solaire $S = 0{,}15$
(store projeté à l'italienne amélioré ou au Sud pare-soleil horizontal + store intérieur),

— surface des parties opaques, ensoleillées

$$s_{ms} = 10{,}2 \text{ m}^2$$

— produit $K\alpha = 2$
$\alpha = 0{,}75$
$K = 2{,}5$

TABLEAU I FAÇADES

Expositions	Apports solaires maximaux (kcal/m² . h)			Écart $t_i - T_{E\,météo}$ au moment du maximum d'ensoleillement dans les écoles très légères ventilées naturellement		
	O, E	SO, SE	S	O, E	SO, SE	S
Qualité p (protection actuelle)						
baies $s_{vi} = 13{,}5$ m² $S = 0{,}15$	1 200	1 100	900			
parois pleines ensoleillées $s_{ms} = 10{,}2$ m² $K\alpha = 2$	850	780	640			
élèves	1 500	1 500	1 500			
TOTAL	3 550	3 380	3 040	6°	5°85	5°35
Qualité q (bonne)						
baies $s_{vi} = 13{,}5$ m² $S = 0{,}10$	800	730	600			
parois pleines ensoleillées $s_{ms} = 10{,}2$ $K\alpha = 1{,}2$	530	500	400			
élèves	1 500	1 500	1 500			
TOTAL	2 830	2 730	2 500	5°1	5°	4°65
Qualité r (très bonne)						
baies $s_{vi} = 10$ m² $S = 0{,}10$	600	550	450			
parois pleines ensoleillées $s_{ms} = 14{,}25$ $K\alpha \leqslant 0{,}5$	200	180	150			
élèves	1 500	1 500	1 500			
TOTAL	2 300	2 230	2 100	4°4	4°3	4°1

La qualité q *est bonne*, elle est obtenue en améliorant la protection des baies et l'isolation des parois pleines, elle est définie comme suit :

— surface des baies $s_{vi} = 13{,}5$ m²
— facteur solaire S = 0,10
(store vénitien extérieur, lames verticales)
— surface des parties opaques ensoleillées

$$s_{ms} = 10{,}2 \text{ m}^2$$

— produit $K\alpha = 1{,}2$
$\alpha = 0{,}75$
K = 1,6 ponts thermiques corrigés.

La qualité r *est très bonne*, c'est pratiquement ce que l'on peut obtenir de meilleur en réduisant au minimum la surface des baies et en prévoyant un pare-soleil pour les parties opaques. L'amélioration de l'isolation des parties opaques est alors secondaire pour le confort d'été. La façade correspondante est caractérisée, comme suit :

— surface des baies $s_{vi} = 10$ m²
— facteur solaire S = 0,10
(store vénitien extérieur, lames verticales)
— surface des parties opaques ensoleillées

$$s_{ms} = 14{,}25 \text{ m}^2$$

— produit $K\alpha \leqslant 0{,}5$,
$K \leqslant 2{,}5$,
$\alpha = 0{,}2$ pare-soleil.

Au tableau I sont aussi portés, pour les diverses expositions et les trois qualités p, q, r, les écarts entre la température intérieure t_i et la température météorologique $T_{E\ météo}$ au moment du maximum d'ensoleillement pour des bâtiments ventilés naturellement.

II. Ventilation naturelle améliorée, ventilation mécanique avec humidification éventuelle

Le flux évacué par la ventilation s'écrit :

$$\Phi_{vent} = 0{,}3\ NV\ (t_i - t'_e)$$

N : nombre de renouvellement d'air ;
V : volume de la classe ;
t_i : température intérieure de la classe ;
t'_e : température de l'air de ventilation.

Il faut chercher à augmenter N et à rapprocher le plus possible t_i de la température extérieure météo ($T_{E\ météo}$). On se propose d'étudier les possibilités d'amélioration de la ventilation naturelle, puis l'intérêt que présente une ventilation mécanique intense accompagnée éventuellement d'un refroidissement de l'air soufflé par évaporation d'eau dans l'air.

1. Ventilation naturelle améliorée

1,1. Ventilation en simple exposition sur la façade ensoleillée

En été, les heures chaudes de la journée sont généralement assez ventées, la direction et la vitesse du vent étant très variables d'un instant à l'autre et d'un endroit à l'autre dans la plupart des régions. On peut avoir, dans un après-midi, un changement de direction de 180°.

Au lycée A, pour un vent moyen d'environ 3 m/s tombant sur la façade ensoleillée, on a trouvé, dans une salle de classe dont les portes sur le couloir étaient fermées et les fenêtres grandes ouvertes, un renouvellement d'air de 10 volumes/heure se faisant avec un air prélevé devant la façade ensoleillée et échauffé de ce fait d'environ 1° par rapport à la température météo. Ce sont ces chiffres qui ont été utilisés au chapitre B.

On n'examinera pas ici en détail le mécanisme de cette ventilation naturelle. Disons que, le vent étant très variable en un même point et d'un point à un autre, la ventilation se fait sous l'action de ces pulsations et des différences de pression le long de la façade ; d'où l'intérêt de prévoir des ouvertures aux extrémités de chaque classe, afin d'avoir entre elles une différence de pression maximale.

On peut penser que certains types de fenêtres et de protections solaires favorisent davantage la ventilation et évitent mieux l'entrée de l'air échauffé le long de la façade que les châssis pivotant autour d'un axe horizontal et les stores projetés à l'italienne utilisés dans de nombreux lycées. Nous n'avons pas actuellement d'éléments permettant de préconiser tel type de fenêtre ou tel type de protection. Mais il est peu probable que l'on puisse, en ventilant uniquement sur la façade ensoleillée, améliorer sensiblement la ventilation naturelle.

Lorsqu'il y a calme de vent ou lorsque le vent devient parallèle à la façade ou tombe sur la façade à l'ombre, le renouvellement d'air est fortement diminué et la température intérieure augmente. L'été 1965 n'a pas été suffisamment ensoleillé pour que nos essais permettent d'être précis sur ce point, mais il semble que le renouvellement d'air puisse être alors réduit à moins de 7 volumes par heure et la température t'_e de l'air de renouvellement portée à plus de 2° au-dessus de la température météo. D'où des conditions encore plus inconfortables.

En fait lorsqu'il n'y a plus de vent sur la façade ensoleillée, certains professeurs recherchent une ventilation transversale.

1,2. Ventilation transversale

Elle n'est actuellement possible dans la plupart des lycées qu'en ouvrant les portes sur les couloirs. On pourrait l'augmenter en ménageant d'autres parties ouvrantes dans la cloison côté couloir.

En l'absence de vent, cette ventilation transversale peut se faire de la façade ou d'un pignon à l'ombre vers la façade au soleil, sous l'action de la dépression due à l'échauffement de l'air devant la façade ensoleillée ; cette dépression diminue lorsqu'on s'élève, et elle est à peu près nulle pour les classes du dernier niveau où elle ne peut pratiquement pas provoquer de ventilation. Au rez-de-chaussée, elle correspond à un vent faible étant donné la hauteur généralement réduite des bâtiments (elle est équivalente à un vent de 1 m/s pour un bâtiment de 10 m de haut) et elle est négligeable devant les pressions ou dépressions provoquées par un vent moyen. Fort heureusement, pendant les heures chaudes de l'été, les périodes de calme de vent sont rares.

On a porté sur la figure 11 le schéma des possibilités de ventilation transversale en fonction de la direction du vent pour le type de plan de bâtiment permettant la meilleure ventilation naturelle. Ce

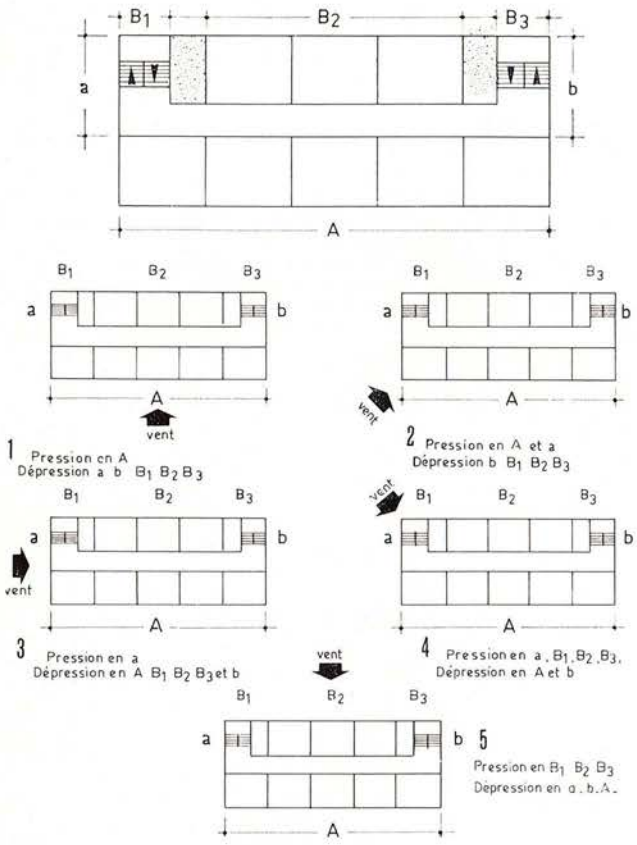


Figure 11

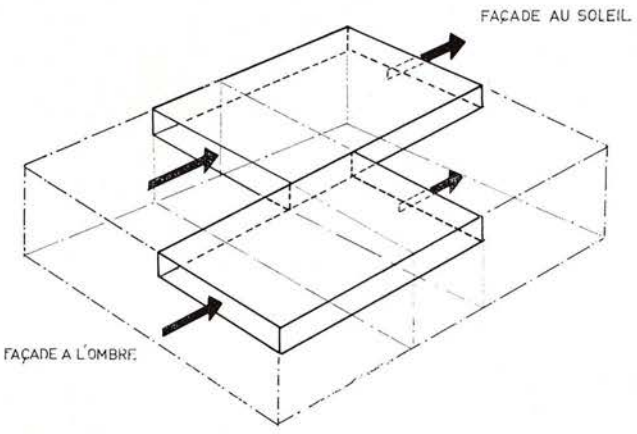


Figure 12
Ventilation naturelle sur la façade exposée.

schéma montre que la ventilation de la classe ensoleillée A est toujours possible soit sur la façade opposée (B_1, B_2, B_3) soit sur l'un des pignons (*a* ou *b*).

a) *Prenons le cas où la ventilation des classes au soleil se fait par l'intermédiaire du couloir sur les cages d'escalier* à chaque extrémité du bâtiment, c'est-à-dire le cas où les ouvertures sur le couloir des classes à l'ombre sont fermées.

Pour créer une surpression ou une dépression importante dans le couloir, il faut, à l'exception des cas nº 5 et 1, fermer les ouvertures sur un côté du couloir. Étant donné les oscillations fréquentes de la direction du vent, on devra très fréquemment ouvrir et fermer les ouvertures *a*, *b*, B_1 ou B_2. En fait, les ouvertures resteront constamment ouvertes et le couloir sera largement balayé par le vent. Pour que les classes soient ventilées dans ces conditions il faudrait prévoir de très larges ouvertures dans la façade et dans la cloison, beaucoup plus importantes que celles actuellement adoptées.

Mais, même alors, le résultat d'une ventilation transversale peut être médiocre, la température de l'air dans le couloir pouvant être nettement supérieure à la température météo. En effet, en exposition Est ou Sud, le maximum de température intérieure est décalé dans le temps par rapport au maximum d'ensoleillement. Il a lieu alors que l'un des pignons reste ensoleillé, même si les baies sur ce pignon sont protégées du soleil, l'air de ventilation qui en parviendra sera à une température supérieure à la température météo.

De plus, si plusieurs classes sont inoccupées et ont leurs stores relevés et leurs fenêtres fermées, la température intérieure peut y être très élevée (près de 20º au-dessus de $T_{E\ météo}$, fig. 9) d'où des apports de chaleur importants dans le couloir qui échauffent l'air de ventilation.

Les expériences faites en enlevant des vitres dans la cloison séparant le couloir d'une classe (2 vitres de 1,50 × 0,90 m) n'ont conduit à aucune amélioration substantielle.

Enfin cette ventilation supprime l'isolation acoustique entre les classes sur la même façade, elle n'est guère réglable et peut provoquer des courants d'air gênants.

b) La ventilation *des classes ensoleillées au travers des classes à l'ombre*, dont on ouvre toutes les portes sur le couloir, est encore plus mauvaise du point de vue acoustique et tout aussi aléatoire.

Si la classe à l'ombre est occupée, l'air qui l'aura traversé sera échauffé par les calories dégagées par les élèves et la température de l'air de ventilation sera encore une fois supérieure de 2º à 3º à la température extérieure météo.

On peut supprimer ces inconvénients en reliant chaque classe à la façade opposée par une gaine de grande dimension placée contre le plafond du couloir et de la classe opposée (fig. 12), mais ce dispositif ne fonctionne pas dans le cas où le vent est parallèle à la façade ou lorsqu'il y a calme de vent.

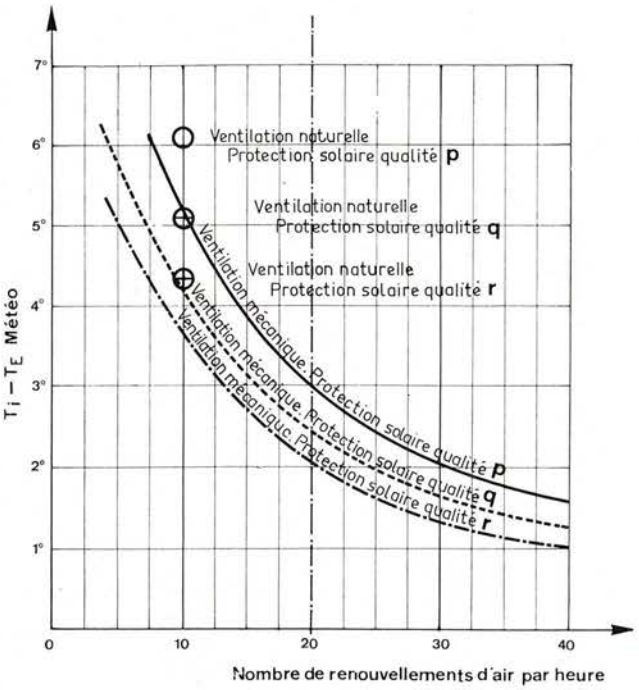


Figure 13
Exposition E, O, SO, SE.

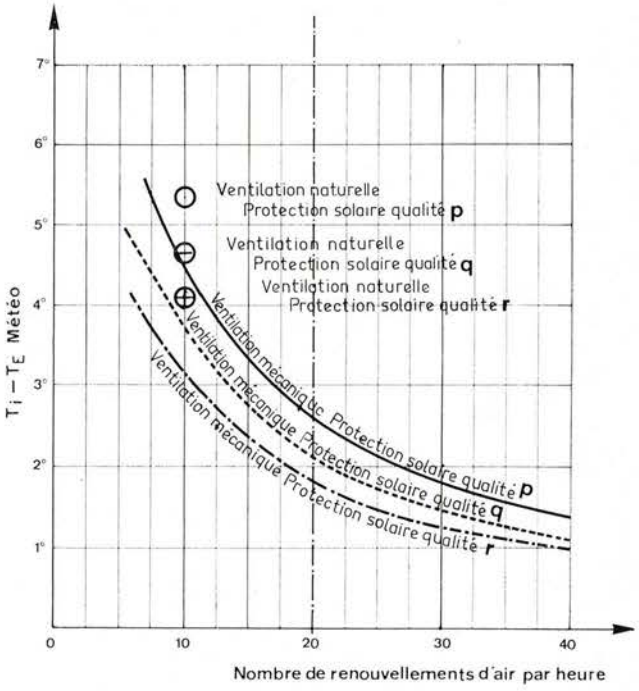


Figure 14
Exposition Sud

Tout ce qui précède conduit à dire qu'*il n'existe pas d'aménagements simples de ces bâtiments permettant d'obtenir d'une façon certaine une grosse amélioration de la ventilation naturelle des classes.*

Ce n'est que dans des régions très particulières où les calmes du vent sont très rares et où la direction et la vitesse de celui-ci varient peu, qu'il sera possible de concevoir une ventilation naturelle efficace en exposant le bâtiment au vent dominant. Ces régions sont peu nombreuses en France, il serait intéressant d'y expérimenter le dispositif de la figure 12.

2. Ventilation mécanique accompagnée éventuellement d'une humidification de l'air

Pour avoir, de façon régulière, un renouvellement d'air supérieur à 10, il est nécessaire de recourir à une ventilation forcée. Ceci permet d'ailleurs d'utiliser un air de ventilation à la température météo en le prélevant là où il n'y a pas d'échauffement par le soleil, par exemple sur un pignon ou sur la façade à l'ombre. A égalité de renouvellement d'air, on gagne ainsi un à deux degrés par rapport à une classe ventilée naturellement.

On a tracé sur les figures 13 et 14 la courbe donnant au moment du maximum d'ensoleillement, l'écart (t_i — $T_{E\ météo}$) entre la température intérieure et la température extérieure météo pour les 3 qualités de façade envisagées ci-dessus et pour des taux de ventilation différents. Sur les figures 13 et 14, on a porté aussi ces écarts dans le cas d'une ventilation naturelle, telle que le renouvellement d'air soit égal à 10 et que l'air de ventilation soit supérieur de 1° à la température météo.

Il semble souhaitable de retenir *pour la ventilation mécanique un renouvellement d'air de 20 volumes/heure,* au-delà duquel l'écart t_i — $T_{E\ météo}$ diminue plus lentement. Sur les figures 17, 18 et 19 sont tracées, pour une école très légère et pour trois écoles semi-lourdes, les variations au cours d'une journée ensoleillée, de la température intérieure dans une salle de classe ventilée mécaniquement avec un renouvellement de 20 volumes par heure et dans une classe du même type ventilée naturellement.

Ces valeurs ont été *vérifiées expérimentalement* au lycée A au cours des mois de juillet et septembre 1965, lorsque les classes étaient inoccupées. On a reproduit au moyen de radiateurs électriques, d'une part, les apports de chaleur dus aux élèves (1 500 kcal/h), d'autre part, les apports solaires lorsque le ciel était couvert, ce qui fut assez fréquent.

On a réalisé un renouvellement de 20 volumes/heure, en prélevant l'air par une gaine souple sur la façade à l'ombre et en le soufflant par un orifice circulaire de 30 cm de diamètre placé au milieu de la cloison côté couloir à 2,50 m du sol. Ceci place l'essai, du point de vue des remous d'air, dans des conditions nettement plus défavorables que si le soufflage avait été fait par plusieurs orifices répartis le long de la cloison. Et pourtant, au niveau des tables (70 cm à 1 m au-dessus du sol), avec un débit de 20 volumes/heure (3 600 m³/h, soit une vitesse de 15 m/s au niveau de l'orifice du soufflage), la vitesse de l'air n'atteignait pas 50 cm/s ; en particulier, une feuille de papier posée sur l'une quelconque des tables ne s'envolait pas. Au niveau du visage, la vitesse de l'air procurait une sensation de fraîcheur. L'air sortait, soit sur la façade par les fenêtres entrouvertes, les portes étant fermées, soit dans le couloir par les portes ouvertes, les fenêtres étant fermées. La figure 15 donne les enregistrements d'une journée d'essais.

L'ouverture des portes sur le couloir présente les inconvénients acoustiques signalés plus haut ; pour pouvoir ventiler fenêtres fermées, il faudrait prévoir une gaine d'extraction. La solution la plus simple et la plus économique paraît être l'*extraction par*

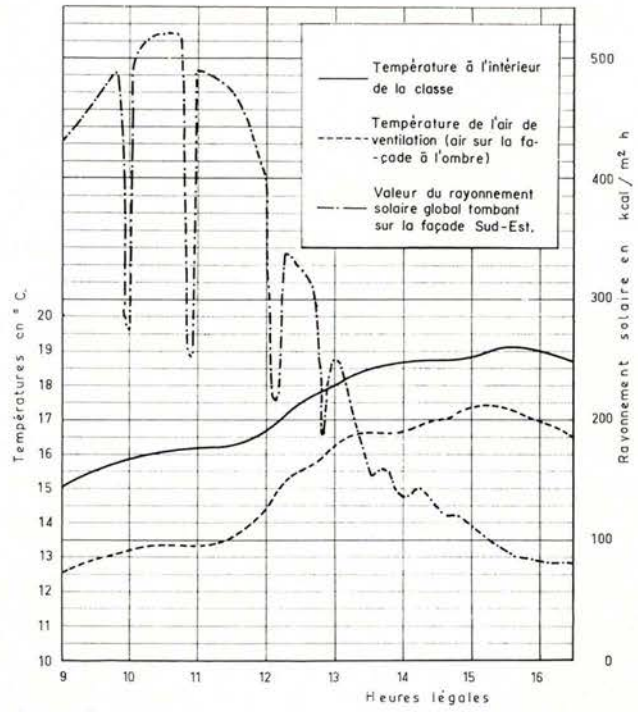


Figure 15

Classe Sud-Est ventilée avec N = 20.
Enregistrement effectué le 10 *septembre* 1965. *La présence des élèves a été simulée par des radiateurs électriques de puissance totale* 1500 *kcal/h.*

les fenêtres entrouvertes ; les risques de variations du débit provoquées par les surpressions dues au vent peuvent être très limités à condition de prendre, dans le calcul de l'installation, certaines précautions qui ne seront pas exposées ici.

Il n'y a pas lieu d'envisager la simple extraction mécanique ; l'air provenant de la façade ou du couloir serait, en effet, à une température supérieure à la température météo.

Ventilation individuelle par classe

L'air du couloir pouvant être à une température supérieure à la température météo, le souffler dans la pièce au moyen de ventilateurs placés dans la cloison n'utilise pas au mieux les possibilités de la ventilation mécanique ; d'autre part, le bruit des ventilateurs peut y être gênant. Il est préférable que l'air de renouvellement soit prélevé sur la façade à l'ombre au moyen d'une gaine traversant la salle de classe à l'ombre (fig. 16). La sortie de l'air se fait par les fenêtres entrouvertes sur la façade au soleil. Le ventilateur peut être placé à un endroit quelconque de la gaine.

L'avantage de ce système est de permettre une ventilation individuelle de chaque classe.

Mais il y a plusieurs inconvénients. Il est difficile de se protéger du bruit du ventilateur et il faut traiter convenablement la gaine pour éviter qu'elle soit

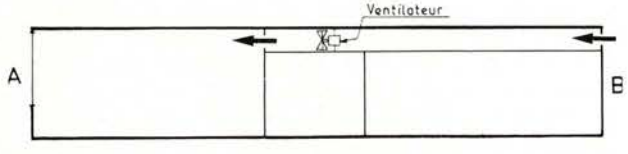


Figure 16

Coupe de deux classes avec ventilation de la classe au soleil par une gaine traversant la classe à l'ombre.

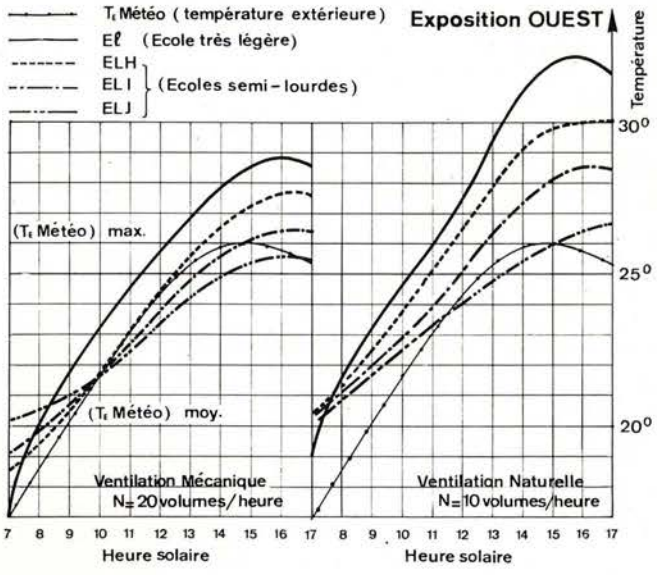


Figure 17

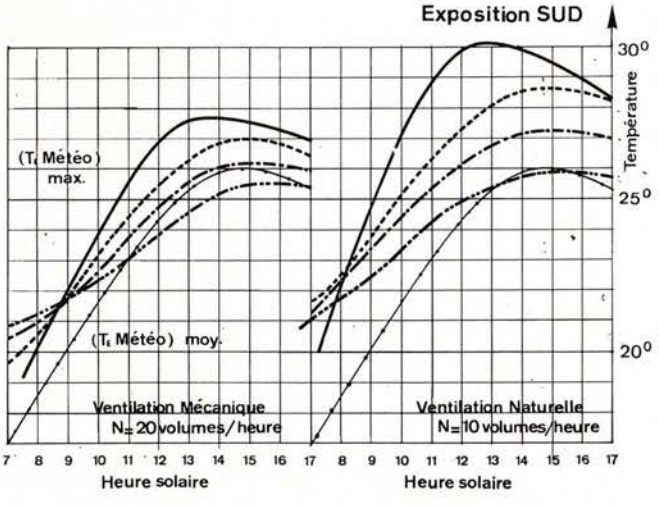


Figure 18

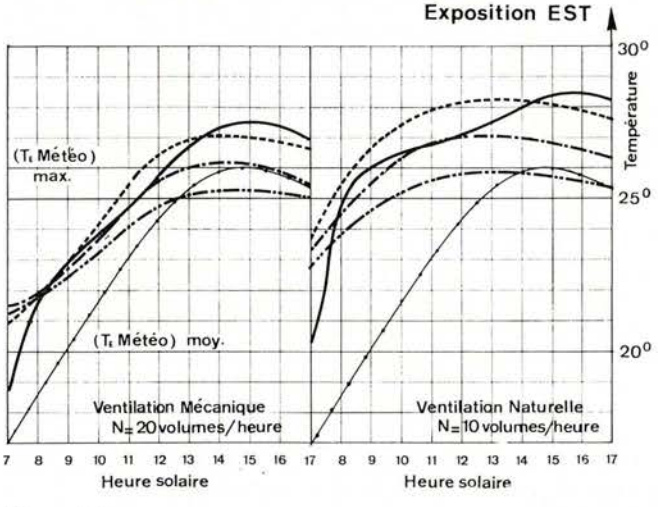


Figure 19

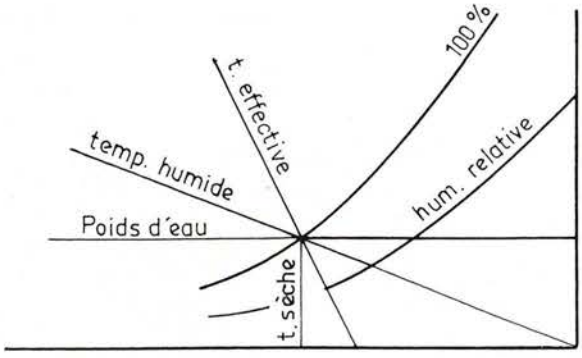


Figure 20

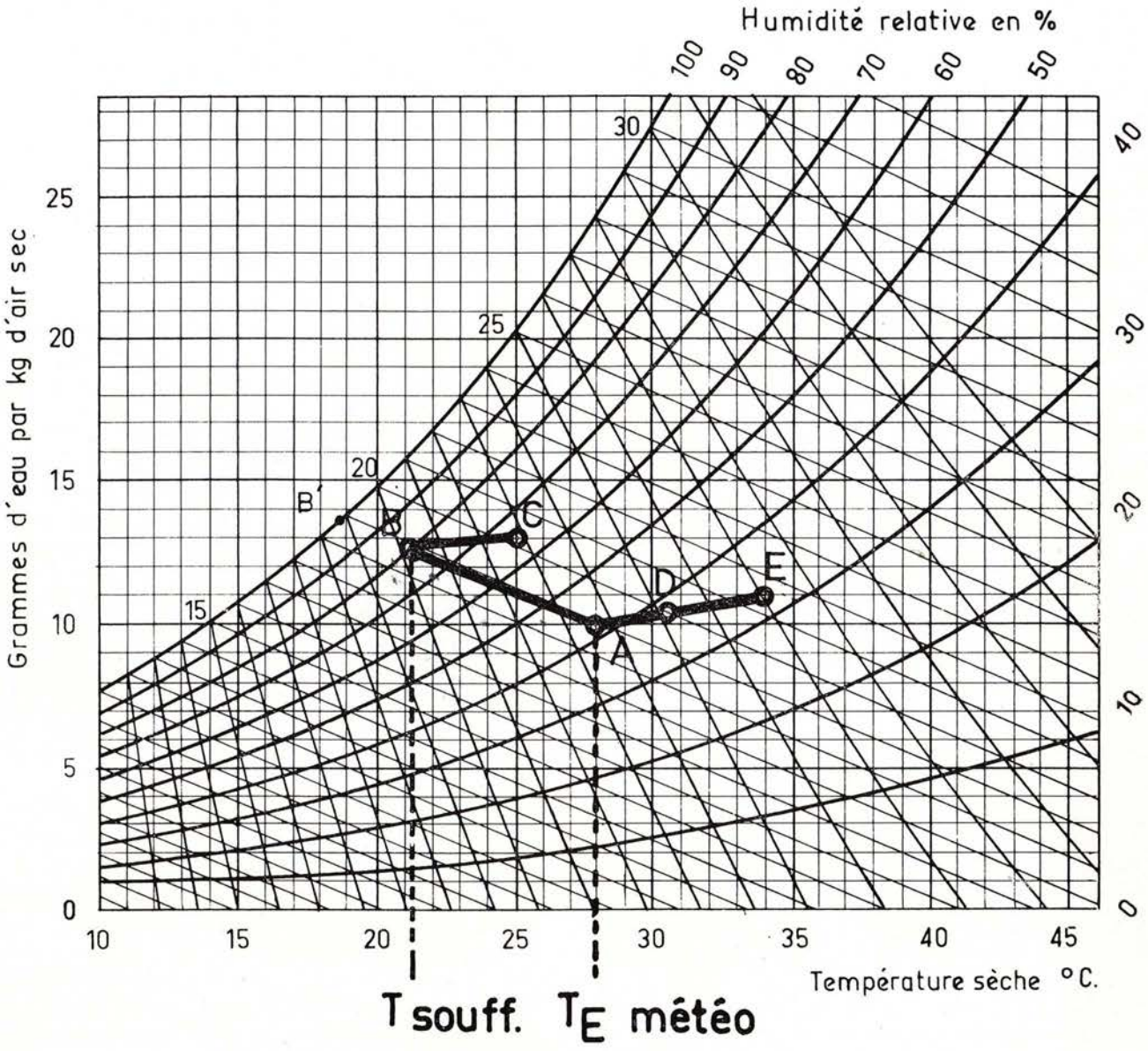
A. *air extérieur.*

B. *air soufflé par l'humidificateur.*

C. *air dans la classe ventilée avec de l'air humidifié (EIVMh).*

D. *air dans la classe ventilée avec de l'air sans humidification (EIVM).*

E. *air dans la classe ventilée naturellement (EIVM).*



un chemin acoustique entre les classes de part et d'autre du couloir. Quand la classe considérée est à l'ombre, plutôt que de ventiler avec de l'air échauffé sur la façade ensoleillée, il vaut mieux arrêter la ventilation, car on n'aura pas un résultat meilleur qu'en ventilation naturelle. Par contre le même ventilateur peut servir pour deux classes opposées, moyennant un système de volet permettant de ventiler alternativement chaque classe quand elle est au soleil.

Ventilation centrale

L'air de renouvellement est prélevé, par une installation centrale de ventilation, dans un endroit constamment abrité du soleil (pignon ou façade Nord) puis est envoyé par un réseau de gaines dans les classes. L'emplacement normal des gaines est contre le plafond du couloir.

On peut ainsi, beaucoup plus aisément qu'en ventilation individuelle, éliminer le bruit des ventilateurs.

La ventilation est possible quelle que soit l'heure de la journée, elle permet de diminuer la température dans la classe à l'ombre et, occupée, d'environ 1,5° par rapport à la ventilation naturelle. Mais on peut également prévoir de ne ventiler que les classes au soleil et diminuer ainsi de moitié la quantité d'air à fournir.

Humidification

Une ventilation mécanique assurant un renouvellement d'air de 20 volumes/heure permet, sans grosse dépense supplémentaire, de pratiquer certains jours une *humidification de l'air de soufflage*, c'est-à-dire un refroidissement de cet air par évaporation d'eau. C'est facilement réalisable avec un système de ventilation centrale en plaçant des panneaux humidifiants entre l'air extérieur et le ventilateur.

Ce procédé, utilisé assez couramment dans les zones désertiques (Sahara) et dans les régions tropicales sèches, demande que le poids d'eau dans l'air ne soit pas trop grand pour obtenir une amélioration sensible du confort.

En France, où les températures d'air sont rarement très élevées et où le poids d'eau dans l'air est d'environ 10 g d'eau par kilogramme d'air sec en moyenne contre 5 à 8 g dans les régions désertiques, ce procédé ne sera sans doute pas utilisable certains jours (cf. chap. D, § 1,2). Mais il doit apporter en général une amélioration très sensible les jours de forte chaleur comme le montre l'exemple ci-dessous.

Exemple de refroidissement de l'air de soufflage par humidification

Prenons un air extérieur dont la température météo est de 28° et contenant 10 grammes d'eau par kilogramme d'air sec (42 % de degré hygrométrique). On a porté, sur le diagramme psychrométrique de la figure 20, le point A représentatif de cet air extérieur.

La température humide correspondante est de 19°. L'humidification de l'air se fait à température humide constante ; on peut assez facilement humidifier l'air jusqu'à 80 % de degré hygrométrique, c'est-à-dire avoir un air de soufflage représenté par le point B à la température sèche t_s, de 21,3° et contenant 12,7 g d'eau par kg d'air sec.

Cet air soufflé est échauffé par les apports dans le local, et la température de l'air t_i à l'intérieur de celui-ci est déterminée comme suit (cf. B. III. 2) :

$$\Phi_{\text{vent. humid.}} = \varphi_{t\ \text{façade}} + \Phi_{s\ \text{mur}} + \Phi_{s\ \text{vitre}} + \Phi_{\text{élèves}}$$

$\varphi_{t\ \text{façade}}$ représentant, cette fois, un apport de chaleur, et $\Phi_{\text{vent. humid.}}$ ayant pour valeur :

$$\Phi_{\text{vent. humid.}} = 54\,N\,[t_i - t_s]$$

au lieu de $54\ N\ (t_i - t'_e)$

On a avec la qualité actuelle de protection solaire (qualité p)

$$20 \times 54\ (t_i - 21{,}3) = 104\ (29 - t_i) + 800 + 1\,200 + 1\,500 ;$$

d'où $t_i = 25°$.

Au poids d'eau contenu dans l'air de soufflage, il faut ajouter la vapeur d'eau dégagée par les élèves. Ceux-ci dégagent chacun à peu près 70 g/h de vapeur d'eau, soit pour 30 élèves, 2 kg de vapeur d'eau. Avec 20 volumes/heures (3 600 m³ d'air ou 4 700 kg) la présence des élèves ajoute 0,42 g d'eau par kg d'air sec.

Finalement, l'ambiance intérieure de la classe ventilée avec de l'air humidifié est représentée par le point C pour lequel la température est 25° et le poids d'eau dans l'air 13,1 g par kg d'air sec (66 % d'hygrométrie).

Sur le diagramme de la figure 20, le point D représente l'ambiance intérieure avec une ventilation mécanique (20 vol/h) sans humidification (température 30,8°, poids d'eau 10,42 g par kg d'air sec, donc hygrométrie 37 %) et le point E représente l'ambiance intérieure d'une classe ventilée naturellement (température 34°, poids d'eau 10,84 g par kg d'air sec, donc hygrométrie 32 %).

Pour comparer ces ambiances, on a porté sur le diagramme les courbes d'égale température effective. Les températures effectives correspondant aux points A, C, D, E sont les suivantes :

— A : 23,5°
— C : 22,8°
— D : 25,2°
— E : 27°.

En rapportant tout à un poids de 10 g d'eau dans l'air, l'impression de confort correspond aux températures sèches suivantes :

— A : 28° (température extérieure météo) ;
— C : 26,5° (température intérieure avec humidification) ;
— D : 31° (température intérieure avec ventilation mécanique) ;
— E : 34,5° (température intérieure avec ventilation naturelle).

L'humidification procure donc, dans ce cas, une grosse amélioration du confort, puisqu'elle permet d'obtenir une impression correspondant à une température inférieure de 1,5° à la température extérieure.

On a expérimenté sommairement, pendant l'été 1966, les possibilités de cette humidification en équipant, au lycée B, une classe exposée à l'Ouest avec des humidificateurs individuels utilisés au Sahara. La figure 21 donne les enregistrements de température d'air et ceux d'hygrométrie obtenus à l'extérieur sous abri, dans la classe ventilée naturellement et dans la classe équipée d'humidificateurs.

Le mardi 14 juin et le mercredi 15 juin, où l'ensoleillement a été continu, les classes étant occupées, on retrouve, dans la classe ventilée naturellement, les 5 à 6 degrés de plus signalés au chapitre B. Dans la classe ventilée avec de l'air humidifié, la température de l'air intérieur, ne dépasse pas la température de l'air extérieur. On ne disposait pourtant, pour ces essais, que d'un humidificateur assurant un renouvellement de 12 volumes/heure, le poids d'eau dans l'air étant de 10 grammes d'eau par kilogramme d'air sec. Avec 20 volumes par heure, on se trouverait à 2 ou 3° au-dessous de la température extérieure, comme dans l'exemple précédent.

Le confort ressenti était nettement amélioré dans cette classe ventilée avec de l'air humidifé, ainsi qu'on l'a constaté à plusieurs reprises en faisant fonctionner les humidificateurs aux mois de juin et juillet.

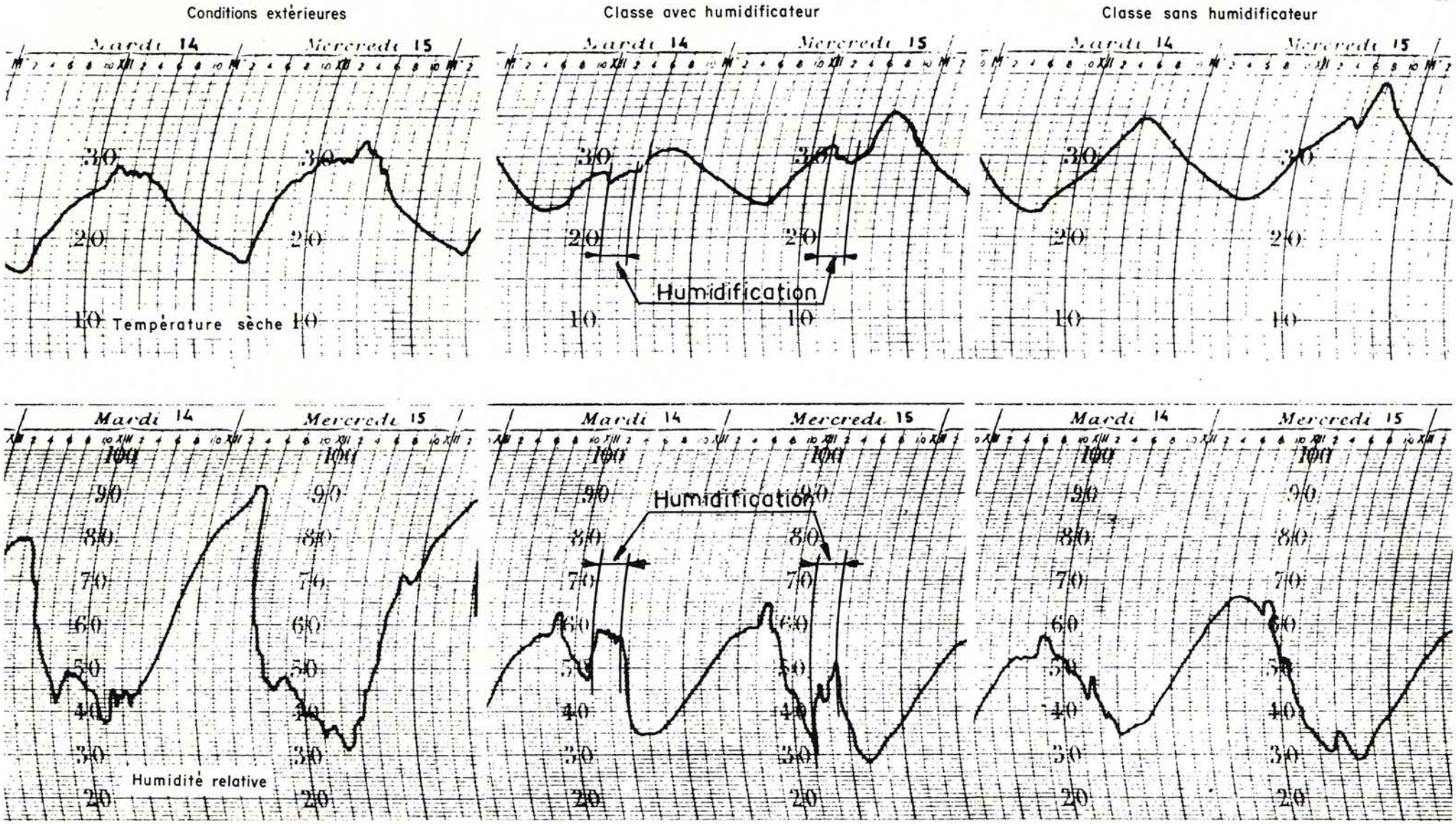


Figure 21

Effets de l'humidification par temps chaud dans une salle de classe occupée.

III. Augmentation de l'inertie thermique

Dans les lycées A, B et C, l'inertie thermique est négligeable.

Utilisant les calculs approchés décrits dans le cahier 608 et quelques mesures par analogie électrique, on a établi ce que donnerait une augmentation de l'inertie dans ces lycées. L'annexe I en donne un exemple. L'analogie électrique a permis de représenter les phénomènes d'une façon assez précise, en particulier d'introduire les différences de ventilation entre le jour (où les classes sont occupées) et la nuit (où elles sont inoccupées), ce qui n'est pas possible dans un calcul manuel.

On a considéré 3 classes semi-lourdes (EL) correspondant aux inerties croissantes H, I, J.

L'inertie H correspond à une dalle de béton de 10 cm isolée très fortement en-dessous, par exemple par un absorbant acoustique constituant le plafond.

L'inertie I correspond à une dalle de béton de 10 cm d'épaisseur en contact sur ses deux faces avec l'air des deux classes superposées.

L'inertie J correspond, à un bâtiment où planchers et parois verticales intérieures sont des dalles de béton de 10 à 15 cm d'épaisseur.

Il est assez facile d'obtenir les inerties H et I sans modification profonde de la structure des écoles métalliques de type A, B ou C. Par contre, si l'on veut obtenir l'inertie J, seule la façade légère peut être conservée.

L'inertie du lycée D est intermédiaire entre les inerties H et I.

Sur les figures 17, 18, 19 sont portées les températures d'air intérieur calculées pour chacune de ces inerties H, I et J, en ventilation naturelle et en ventilation mécanique, avec la protection solaire actuelle (qualité *p*). Les figures 22, 23, 24 correspondent au seul cas de la dalle pleine sans revêtement isolant (inertie I) avec la ventilation naturelle et la ventilation mécanique.

On voit que le résultat est d'autant meilleur que l'inertie est plus forte, les différences étant plus marquées en ventilation naturelle qu'en ventilation mécanique.

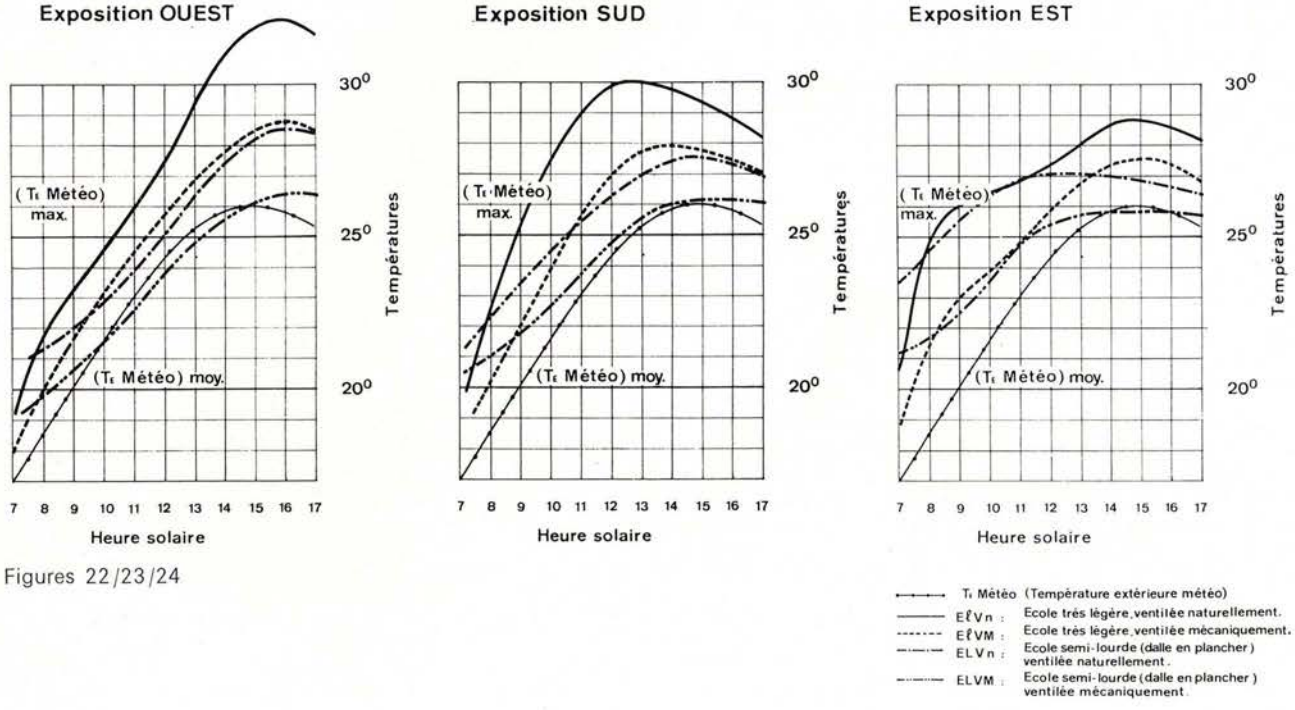
Avec la plus forte inertie J, en ventilation naturelle, la température intérieure maximale est ramenée au niveau du maximum de température extérieure météo dans les classes exposées au soleil pour la qualité actuelle *p* de façade. Avec la très bonne qualité *r*, on se trouve un peu au-dessous du maximum météo (0,5° au-dessous).

IV. Superposition des différents aménagements proposés

Le tableau II donne les écarts entre le maximum de température intérieure et le maximum de la température extérieure météo lorsqu'on applique une ou plusieurs des améliorations étudiées ci-dessus pour les diverses expositions.

Pour l'exposition Ouest, en ventilation naturelle (Vn), une très forte *amélioration de la façade* (qualité *p* à qualité *r*) permet de gagner 1° à 1,5° aussi bien pour les écoles très légères (El) que pour les écoles semi-lourdes (EL). Mais en ventilation mécanique (VM) le gain n'atteint pas 1°.

Pour l'exposition Sud, que ce soit en ventilation naturelle (Vn) ou en ventilation mécanique (VM), l'écart dû à une amélioration de la façade n'atteint pas 1°. Cela tient à ce que, pour cette exposition,



Figures 22/23/24

TABLEAU II QUALITÉ DE LA PROTECTION SOLAIRE

		Exposition Ouest				Exposition Est				Exposition Sud				Exposition Nord			
		EI	EL			EI	EL			EI	EL			EI	EL		
			H	I	J		H	I	J		H	I	J		H	I	J
p	Vn	6°	4°	2°5	0,6	2°8	2°5	1°1	0°	4°	2°6	1°5	0	2°8	1,4	0	—1,4
actuelle	VM	2°7	1°5	0°5	—0,5	1°4	1°	0°	—0°7	1°7	1°	0°	—0°5	1°4	0,6	—0,4	—1,6
q	Vn	5°	3°	1°5	0°	2°9	2°	0,7	—0,3	3°5	2°3	1°3	—0,1	2°9	1,5	0	—1,4
bonne	VM	2°3	1°2	0°2	—0,7	1°5	1°	0°	—0,8	1°6	1°	0°	—0,6	1°5	0,7	—0,4	—1,6
r	Vn	4°5	2°5	1°	—0,5	3°	1,8	0,5	—0,5	3°3	2°	1°	—0,3	3°	1,6	0	—1,4
très bonne	VM	2°	1°	0°	—1	1°6	1	—0,2	—0,9	1°4	1	0°	—0,7	1°6	0,8	—0,4	—1,6

EI : école métallique très légère.
EL : école semi-lourde H. dalle avec isolant au plafond.
I. dalle sans revêtement isolant
J. toutes parois intérieures lourdes.
Vn : ventilation naturelle
VM : ventilation mécanique (20 volumes/heure).

au moment du maximum de température intérieure, ce sont les apports dus aux élèves qui sont déterminants (plus de 70 %).

Pour les expositions Est et Nord il n'y a plus ou pas d'apport solaire au moment des maximums de température intérieure et l'amélioration de la façade y est sans intérêt, elle peut même être défavorable pour les écoles très légères (EI), car elle diminue les déperditions par la façade au moment du maximum de température.

Il n'y a donc que dans le cas de l'exposition Ouest et avec une ventilation naturelle (Vn) que l'amélioration de la façade est payante.

Notons aussi qu'adopter la qualité *r*, c'est pratiquement utiliser un store vénitien extérieur qui peut permettre une ventilation naturelle un peu meilleure que celle possible actuellement.

De toute façon *on gagne beaucoup plus à adopter la ventilation mécanique (VM)*, le gain sans changer la façade actuelle (qualité *p*) est de 3°3 à l'Ouest, 2°3 au Sud, 1°4 à l'Est et au Nord.

A partir du moment où il y a ventilation mécanique (VM), l'amélioration de la protection solaire présente un intérêt très réduit même pour l'exposition Ouest (gain inférieur à 1°).

Avec la protection solaire actuelle (qualité *p*) ajouter une *dalle de béton* (EL Vn) ou ventiler mécaniquement (EL VM) revient à peu près au même.

Si l'on adopte en même temps une dalle de béton et la ventilation mécanique (ELVM) le maximum de température intérieure est ramené au niveau du maximum de température extérieur météo. Il est alors sans aucun intérêt d'améliorer la protection solaire actuelle (de *p* à *r* on gagne 1/2 degré à l'Ouest).

Enfin, et il y a là dans certaines conditions une grosse amélioration du confort, la ventilation mécanique permet d'utiliser certains jours un *refroidissement de l'air de ventilation par évaporation d'eau.*

Figures 25/26/27

Nombre de jours ouvrables à PARIS où la température maximale intérieure atteint ou dépasse une température donnée.

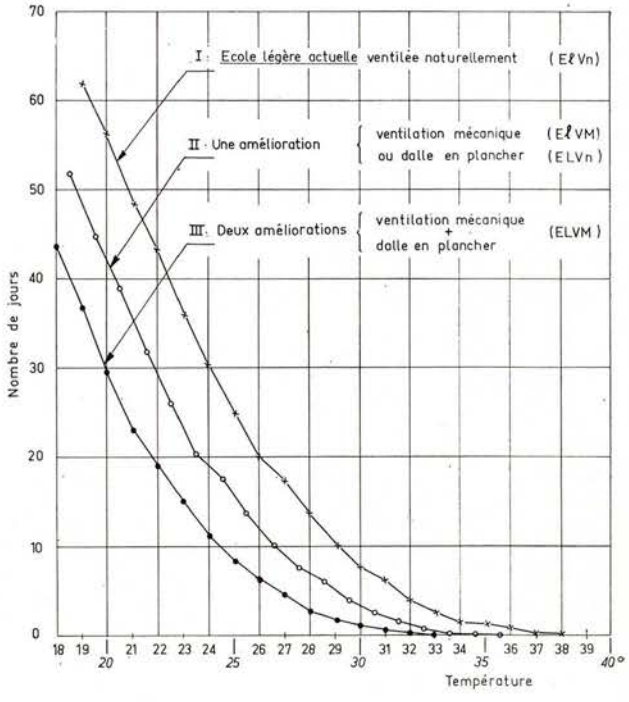


Figure 25

Exposition Ouest (ou Sud sous-toiture).

D. Étude du confort pendant tous les jours chauds de l'année scolaire, à Paris et à Montpellier, dans les écoles métalliques avec et sans amélioration et dans les écoles traditionnelles

I. Écoles métalliques avec et sans amélioration

N'est examiné, dans ce qui précède, que le cas du mois de juin à Paris.

On se propose d'étendre les résultats précédents à toutes les journées chaudes de l'année scolaire pour Paris et pour Montpellier, une des villes les plus chaudes du Midi.

On étudie d'abord les cas où il n'y a pas d'humidification de l'air, on apprécie ensuite les possibilités de l'humidification de l'air accompagnant une ventilation mécanique.

1. Amélioration sans humidification de l'air

A l'annexe II, figure l'étude qui nous a permis d'étendre les résultats du chapitre C précédent à toute la période scolaire chaude.

Grâce aux données quotidiennes de températures et de durée d'ensoleillement correspondant à cinq années d'observations (1958-1963), on a calculé les fréquences de températures intérieures maximales suivant les expositions pour Paris et Montpellier.

Les figures 25 à 30 et les tableaux III et IV donnent, pour chaque exposition et pour chacune des villes considérées, le nombre de jours ouvrables pendant une année scolaire moyenne (on a exclu les jeudis et les dimanches, ainsi que le mois de juillet et le mois d'août) où la température intérieure atteint ou dépasse une température donnée.

Sur chaque figure, trois courbes I, II, III sont tracées.

La courbe I correspond à la *situation actuelle* d'une école métallique très légère ventilée naturellement et ayant une protection solaire satisfaisante (store extérieur en bon état) (El Vn).

La courbe II correspond à une seule des deux améliorations permettant de diminuer sensiblement l'inconfort c'est-à-dire *soit l'utilisation d'une ventilation mécanique à 20 volumes/heure (EIVM), soit la construction d'une dalle de béton en plancher* (ELVn).

La courbe III donne le résultat obtenu en superposant ces deux améliorations c'est-à-dire *la construction d'une dalle de béton en plancher accompagnée d'une ventilation mécanique à 20 volumes/heure* (ELVM) (2).

On a vu qu'une autre amélioration possible est de réduire la surface des baies. En réduisant celle-ci au sixième de la surface au sol des classes et en disposant une excellente protection solaire non seulement devant les vitres (stores vénitiens extérieurs) mais également devant les parties opaques

2. Comme ces deux améliorations ramènent le maximum de température intérieure au niveau de celui de la température extérieure, la courbe III est celle des fréquences de températures extérieures maximales.

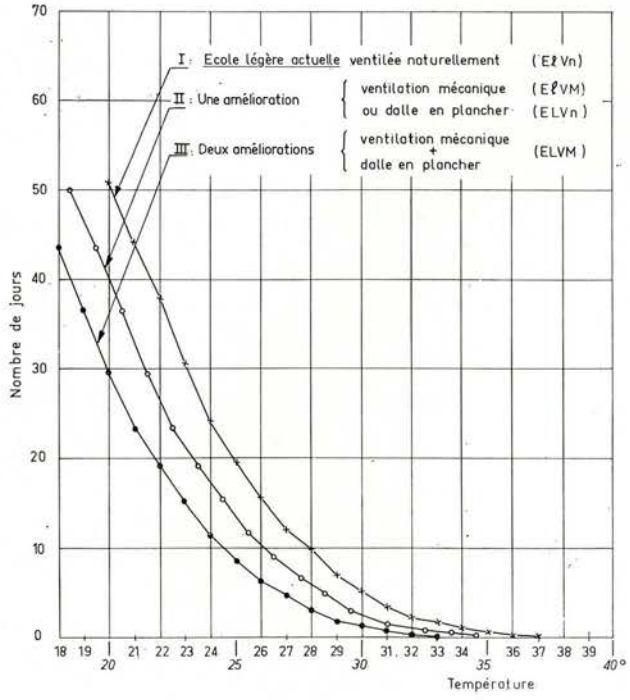


Figure 26
Exposition Sud (classes intermédiaires).

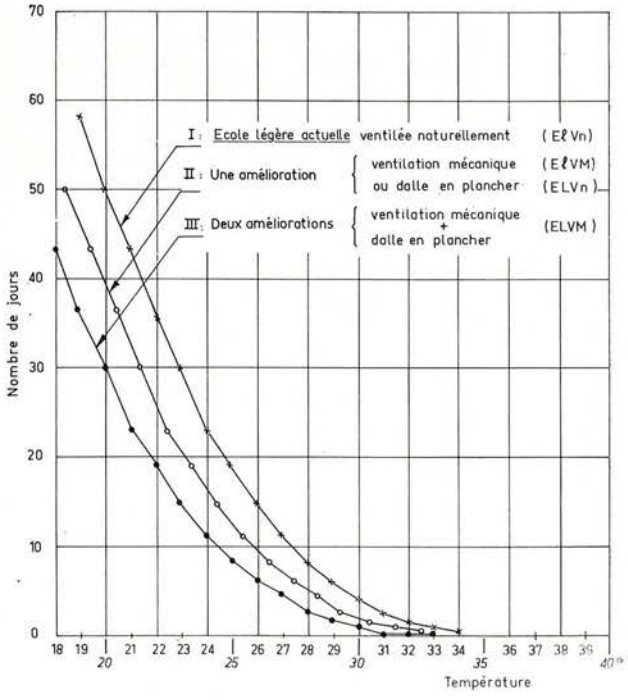


Figure 27
Exposition Est ou Nord.

Figures 28/29/30

Nombre de jours ouvrables à MONTPELLIER où la température maximale intérieure atteint ou dépasse une température donnée.

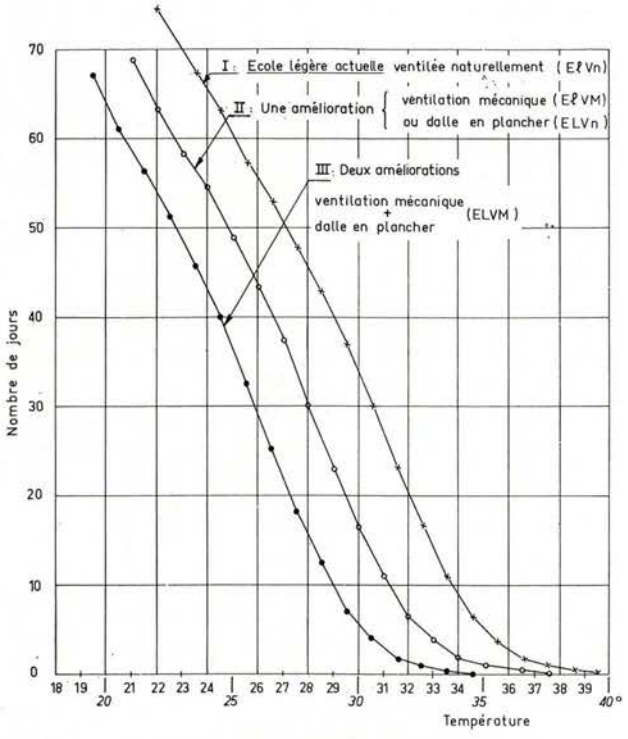


Figure 28 *Exposition Ouest (ou Sud sous-toiture).*

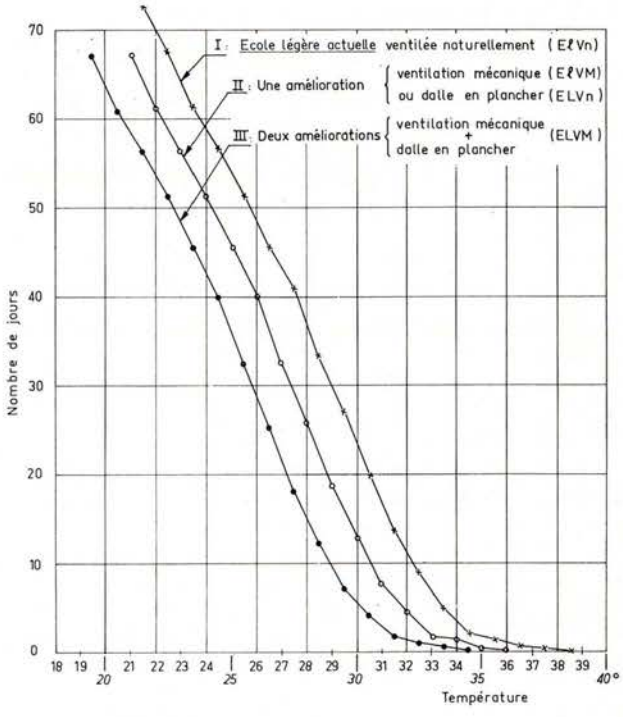


Figure 29 *Exposition Sud (Classes intermédiaires).*

TABLEAU III NOMBRE DE JOURS OUVRABLES A *PARIS* OU LA TEMPÉRATURE MAXIMALE INTÉRIEURE ATTEINT OU DÉPASSE LES TEMPÉRATURES CI-DESSOUS PENDANT UNE ANNÉE NORMALE.

	Températures	20°	22°	24°	26°	28°	30°	32°	34°	36°
Exposition Ouest (ou Sud sous-toiture)	Situation actuelle El Vn	56	43	31	20	14	8	4	2	1
	Amélioration simple El VM ou EL Vn	42	28	19	12	7	3	1		
	Amélioration double EL VM	30	19	11	6	3	1	1		
Exposition Est ou Nord	Situation actuelle El Vn	50	35	23	15	8	5	2	1	
	Amélioration simple El VM ou EL Vn	40	26	17	10	6	2	1		
	Amélioration double EL VM	30	19	11	6	3	1	1		
Exposition Sud (intermédiaire)	Situation actuelle El Vn	51	38	24	16	10	6	2	1	
	Amélioration simple El VM ou EL Vn	41	26	17	11	7	3	2	1	
	Amélioration double EL VM	30	19	11	6	3	1	1		

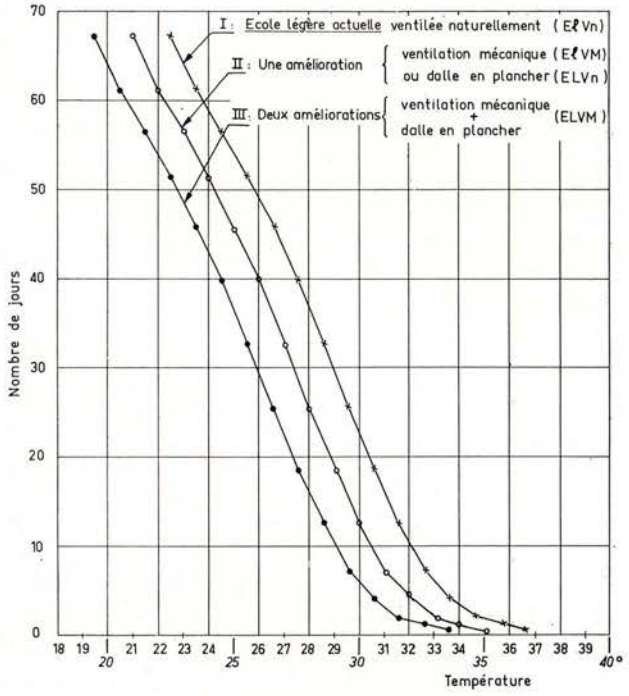


Figure 30 *Exposition Est ou Nord.*

de la façade (écran pare-soleil) on obtient une amélioration moindre qu'en ventilant mécaniquement. De plus, la protection solaire perd de son intérêt les jours où le ciel est légèrement couvert. On n'a pas étudié systématiquement l'effet de cette amélioration au cours de l'été.

2. Ventilation mécanique accompagnée d'une humidification de l'air

L'annexe III donne l'étude théorique permettant d'apprécier les possibilités de l'humidification pendant les jours chauds de l'année scolaire.

Avec les données quotidiennes de température et d'hygrométrie relatives à la période 1958-1963, on a calculé les fréquences des températures effectives maximales extérieures pour Paris et Montpellier. Les courbes I des figures 31 et 32 donnent le nombre de jours ouvrables pendant une année scolaire (on a exclu les jeudis et dimanches, ainsi que le mois de juillet et le mois d'août) où la température effective extérieure atteint ou dépasse une température donnée dans chacune de ces villes.

On a établi, pour chaque jour, une *limite supérieure* de la température effective maximale à l'intérieur d'une classe très légère ventilée avec de

TABLEAU IV NOMBRE DE JOURS OUVRABLES A *MONTPELLIER* OU LA TEMPÉRATURE MAXIMALE INTÉRIEURE ATTEINT OU DÉPASSE LES TEMPÉRATURES CI-DESSOUS PENDANT UNE ANNÉE NORMALE.

	Températures	20°	22°	24°	26°	28°	30°	32°	34°	36°	38°
Exposition Ouest (ou Sud sous-toiture)	Situation actuelle El Vn		74	66	56	46	34	20	8	3	1
	Amélioration simple El VM ou EL Vn		71	61	44	31	17	7	2	1	
	Amélioration double EL VM		54	43	28	16	6	2	1		
Exposition Est ou Nord	Situation actuelle El Vn		70	58	49	36	23	10	3	1	
	Amélioration simple El VM ou EL Vn		61	51	40	26	13	5	1		
	Amélioration double EL VM		54	43	28	16	6	2	1		
Exposition Sud (intermédiaire)	Situation actuelle EL VM		70	59	49	37	24	11	3	1	
	Amélioration simple El V ou EL Vn		61	51	41	27	13	5	1		
	Amélioration double EL VM		54	43	28	16	6	2	1		

l'air humidifié (EIVMh) et exposée à l'Ouest (ou au Sud sous-toiture) ; cette limite supérieure correspond à un ensoleillement continu (cf. annexe III), car on n'a pas tenu compte de l'ensoleillement discontinu ou nul de certaines journées chaudes.

On a calculé, pour les jours ouvrables des cinq années de 1958 à 1963, les fréquences de ces limites supérieures qui sont données dans chacune des villes par les courbes II des figures 31 et 32. On constate que les courbes II sont un peu au-dessous des courbes I (3).

Rappelons que le maximum de température effective atteinte dans une classe légère ventilée mécaniquement et possédant une dalle de béton en plancher (ELVM) est égal au maximum de température effective extérieure.

3. Prix du fonctionnement de la ventilation mécanique avec et sans humidification

Il faut compter une dépense d'énergie d'environ 0,20 Wh par mètre cube/heure soufflé sans humidification et 0,25 Wh avec humidification, la différence étant due aux pertes de charge introduites par les filtres humidificateurs.

Pour une classe de 180 m³ ventilée 20 fois par heure (3 600 m³/heure) cela fait :

— 0,7 kWh sans humidification,

— 0,9 kWh avec humidification.

Au tarif vert de l'EDF, le kilowatt-heure de jour, en été, revient à environ 10 centimes ; la dépense par classe et par heure sera donc :

— 7 centimes sans humidification,

— 9 centimes avec humidification.

Pour une durée de fonctionnement de 6 heures par jour pendant 40 jours à Paris et 80 jours à Montpellier, la dépense par classe sera à Paris de :

— 17 francs sans humidification,

— 22 francs avec humidification.

à Montpellier de :

— 34 francs sans humidification,

— 44 francs avec humidification.

Ces prix donnent l'ordre de grandeur des dépenses par classe pour tout l'été. Les dépenses en eau, lorsqu'il y a humidification, sont négligeables devant ces chiffres.

II. Écoles traditionnelles

On n'a envisagé que des écoles où l'inertie n'était pas suffisante pour atténuer l'influence d'une journée chaude isolée, ces bâtiments se mettant en régime en moins d'une journée.

Avec une inertie plus grande, comme celle que l'on rencontre dans les lycées traditionnels, le bâtiment met 2 à 3 jours pour être en régime ; c'est le cas du lycée E. On a alors une atténuation de l'influence des journées isolées très chaudes.

Dans les classes intermédiaires d'un lycée traditionnel très inerte (plancher et paroi verticale équivalents à au moins 15 cm de béton) et très bien protégé du soleil (baies vitrées de dimensions réduites 10 m² pour une classe de 60 m², protection de facteur solaire 0,10), l'application des calculs approchés du

3. En face des températures effectives on a porté les températures sèches correspondant à un poids d'eau de 10 grammes par kilogramme d'air sec, valeur moyenne durant les mois d'été en France.

On ne peut comparer directement les courbes des figures 31 et 32 à celles des figures 25 à 30 du paragraphe précédent. En effet, d une part on n'a pas tenu compte au paragraphe précédent de l'humidité de l'air, d'autre part les courbes des figures 25 à 30 ont été établies à partir de données s'étendant sur une période de quarante ans (1891 à 1930) et correspondant donc à une année moyenne normale, alors que les figures 31 et 32 ont été établies à partir de données s'étendant sur cinq années seulement (1958 à 1963) au cours desquelles l'été fut en moyenne moins chaud que la normale à Montpellier et plus chaud à Paris.

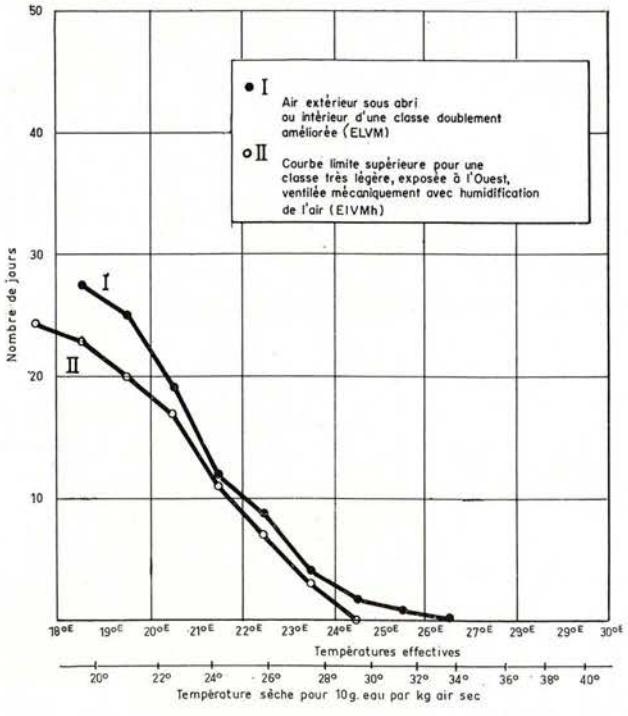


Figure 31 *Paris*

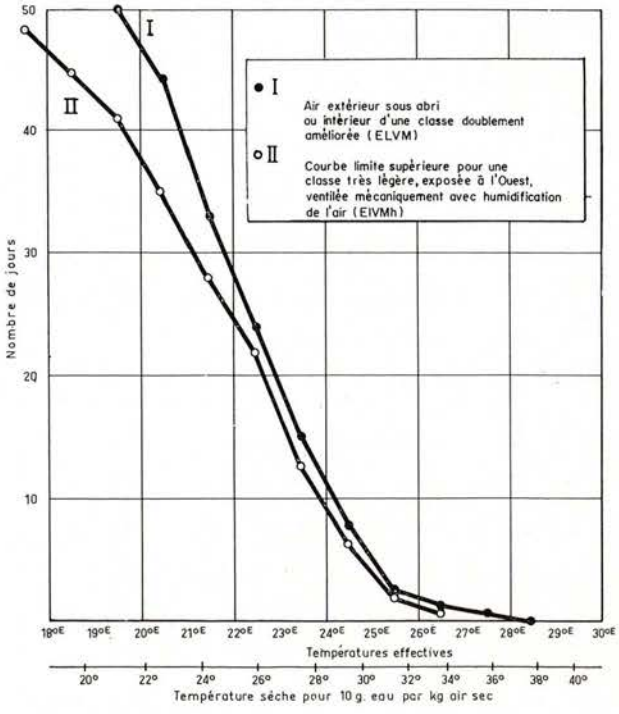


Figure 32 *Montpellier*

Nombre de jours ouvrables où la température effective maximale intérieure ou extérieure atteint ou dépasse une température effective donnée.

cahier 608 indique, qu'au cours d'une année moyenne la température intérieure, si on laisse les fenêtres entrouvertes, ne dépasse pas 25° à Paris, 29° à Montpellier. En prévoyant une ventilation mécanique de 6 volumes-heure permettant de ventiler les classes avec un air non échauffé par le soleil, on peut abaisser ces températures de 1 à 2°.

En fait, dans la région parisienne les protections solaires des lycées traditionnels sont souvent médiocres et les fenêtres sont grandes ouvertes pendant l'été. Les températures intérieures y dépassent 25° assez souvent.

A Montpellier, par contre, il est plus courant de prévoir de très bonnes protections ; dans un lycée traditionnel, la température de 29° constitue bien une limite supérieure pendant une année moyenne.

E. Conclusions

I. Aux chapitres A, B, et C, on a étudié le confort à l'intérieur d'une classe occupée pendant une journée chaude ensoleillée du mois de juin à Paris.

Dans leur conception actuelle, les écoles sont ventilées naturellement sur la façade exposée au soleil. Lorsque toutes les ressources du bâtiment sont utilisées (stores baissés, fenêtres ouvertes), la température intérieure maximale atteinte dans une école très légère dépasse la température extérieure météo maximale de 6° sur une exposition Ouest, de 4° sur une exposition Sud et de 3° sur une exposition Est ou Nord. Ces chiffres restent valables pour les classes sous toiture exposées à l'Ouest, à l'Est et au Nord. Pour les classes sous toiture exposées au Sud la température est majorée de 1° à 2° ; elle est alors voisine de celle atteinte en exposition Ouest. Les conditions intérieures peuvent donc être inconfortables dans une école très légère surtout à l'Ouest et au Sud.

Un perfectionnement de la ventilation naturelle n'améliorera guère la situation. Il n'y a que dans certains sites, exceptionnels en France, où la direction du vent varie peu, que ce perfectionnement peut être envisagé.

Pour obtenir une véritable amélioration sans modifier profondément la conception des écoles métalliques, il semble qu'il n'y ait que deux aménagements possibles :

— soit une *ventilation mécanique* assurant un renouvellement d'air d'environ 20 fois le volume de la classe par heure,

— soit *une dalle pleine en béton* constituant le plancher.

En les appliquant séparément, on obtient à peu près le même résultat avec l'une ou l'autre de ces solutions pour les classes exposées au soleil. C'est-à-dire que l'on diminue la température intérieure maximale d'environ 3° à l'Ouest, 2° au Sud, 1,5° à l'Est. Au Nord, par contre, si le gain est de 1,5° avec la ventilation mécanique, il atteint près de 3° avec la dalle.

Appliqués simultanément, ces deux aménagements ajoutent à peu près leurs effets, c'est-à-dire que l'abaissement de température intérieure maximale est généralement doublé. Il est de 6° à l'Ouest, de 4° au Sud, de 3° à l'Est. Au Nord, il est de 3°.

Ces chiffres sont valables quelle que soit la situation de la classe à l'Ouest, à l'Est et au Nord. Pour les classes sous toiture au Sud, il faut prendre les valeurs correspondant à l'exposition Ouest.

La recherche d'une protection solaire excellente est beaucoup moins payante que ces deux aménagements.

En l'absence de dalle de béton constituant le plancher et de ventilation mécanique, l'amélioration de la protection solaire permet, au mieux, de diminuer la température intérieure maximale de 1,5° à l'Ouest et de 1° au Sud ; le gain est nul à l'Est et bien entendu au Nord. S'il y a une dalle, on gagne encore 1,5° à l'Ouest, mais seulement 0,5° au Sud et à l'Est. Si l'on réalise une ventilation mécanique, ces gains deviennent négligeables : moins de 1° à l'Ouest.

Cela tient à ce que les classes légères actuelles, et notamment celles où ont été faites les observations, ont déjà une protection solaire assez bonne. Elle est faite généralement de stores de toile sombre, projetés à l'italienne, mettant la baie complètement à l'ombre au moment du maximum d'ensoleillement. Dans ces conditions les apports solaires maximaux, même à l'Ouest, ne sont pas supérieurs aux apports dus aux élèves. On obtiendrait un résultat identique sur les façades d'exposition comprise entre le SSO et le SSE, avec un pare-soleil horizontal et un store de toile intérieur.

En fait, cependant, la protection qu'assurent les stores de toile en place est souvent aléatoire. Les stores sont fragiles et se détraquent, ils ne descendent pas assez bas. Quand un store est démoli et que le rayonnement direct entre librement, le résultat est catastrophique ; sans store, les apports totaux sont à peu près triplés et on peut avoir une température intérieure supérieure de plus de 15° à la température extérieure. Il ne serait pas sans intérêt d'étudier une amélioration de la conception actuelle des stores afin de rendre leur protection certaine ; il semble que l'on puisse aussi, sans inconvénient grave pour l'éclairage intérieur, diminuer la surface vitrée.

En passant à une protection solaire excellente (diminution de la surface des baies, store vénitien extérieur, pare-soleil devant les parois opaques), on réduit de moitié les apports solaires ; mais, par rapport aux apports totaux, la diminution est au plus de 30 %, car les apports dus aux élèves restent inchangés et deviennent prédominants.

L'exposition Sud-Nord ne présente guère d'avantages sur l'exposition Est-Ouest lorsqu'il y a ventilation mécanique ou plancher constitué par une dalle en béton et encore moins lorsqu'on prévoit à la fois ces deux aménagements. Cela résulte en partie de ce que les apports dus aux élèves sont du même ordre de grandeur que les apports solaires.

Cependant, seule l'exposition Sud-Nord permet de prévoir au Sud des pare-soleil horizontaux fixes, donc aisément réalisables de façon robuste ; d'autre part, on fait l'économie des protections au Nord. C'est en cela que réside l'intérêt de l'exposition Nord-Sud. Par contre l'assombrissement que provoquent les pare-soleil horizontaux fixes ne permet pas de diminuer la surface des vitrages.

II. Au chapitre D, on a étudié la fréquence de l'inconfort en envisageant tous les jours chauds d'une année scolaire moyenne à Paris et à Montpellier. Les figures 25 à 30 et les tableaux III et IV permettent de conclure ainsi :

A Paris pendant un été normal la situation actuelle est très inconfortable, à l'Ouest et dans les classes sous toiture au Sud, on a 14 jours ouvrables au-dessus de 28°, 8 au-dessus de 30°, 4 au-dessus de 32°.

Les classes exposées à l'Est et au Nord sont assez inconfortables (8 jours au-dessus de 28°, 5 jours au-dessus de 30°), les classes Nord étant cependant plus fraîches le matin que les classes Est, tout en demeurant aussi inconfortables l'après-midi. Les classes intermédiaires exposées au Sud sont un peu plus inconfortables que les classes Est et Nord.

Une seule amélioration c'est-à-dire soit une ventilation mécanique à 20 volumes/heure (ELVM), soit une dalle pleine en plancher (ELVn) *crée dans les classes Sud sous toiture et dans les classes Ouest un confort un peu meilleur que celui régnant à l'Est et au Nord* en diminuant de plus de moitié le nombre de jours d'inconfort notoire (7 jours ouvrables au-dessus de 28°, 3 jours au-dessus de 30°, 1 jour au-dessus de 32°). Cette seule amélioration donne encore un résultat intéressant dans les classes intermédiaires exposées au Sud ; elle est moins payante à l'Est et au Nord.

La double amélioration, c'est-à-dire une dalle pleine en plancher et une ventilation mécanique (ELVM), *amène le confort au niveau de celui ressenti à l'ombre et à l'extérieur, cela dans toutes les classes quelles que soient leur exposition et leur situation dans le bâtiment* (6 jours au-dessus de 26°, 3 jours au-dessus de 28°, 1 jour au-dessus de 30°). Ce confort est très acceptable.

A Montpellier les écoles très légères actuelles ne seront pas acceptables sans modification, à moins de ne faire les cours qu'aux heures fraîches c'est-à-dire le matin. Sur une exposition Ouest, la température maximale intérieure dépasse pendant 34 jours ouvrables 30°, pendant 20 jours 32°, il y a 8 jours au-dessus de 34° et 3 jours au-dessus de 36°. Il en est de même pour les classes sous toiture au Sud.

Les classes intermédiaires au Sud donnent à peu près le même résultat que les classes Est ou Nord et ce résultat est à peine meilleur qu'à l'Ouest (23 jours au-dessus de 30° ,10 jours au-dessus de 32°, 3 jours au-dessus de 34°).

La double amélioration (dalle pleine en plancher et ventilation mécanique), *permet comme ci-dessus de ramener le confort au niveau de celui régnant à l'ombre à l'extérieur, cela dans toutes les classes quelles que soient leur exposition et leur situation. Il y fera donc encore chaud.*

En complétant la ventilation mécanique *par une humidification de l'air* (provoquant un refroidissement par évaporation d'eau), *il semble que sans dalle de béton constituant le plancher, on puisse ramener le confort au moins au niveau de celui régnant à l'ombre à l'extérieur, aussi bien à Paris qu'à Montpellier. L'intérêt d'une dalle est alors réduit.* Cependant, nous n'avons fait qu'une courte expérimentation des possibilités de l'humidification, d'autre part notre étude est fondée sur la notion de température effective assez contestée (voir Revue bibliographique. I. 3, page 50).

Une étude plus approfondie de cette solution est donc nécessaire.

On peut aussi envisager, avec la ventilation mécanique, de *prélever l'air de renouvellement dans les soubassements* pour utiliser l'inertie thermique de ceux-ci.

Ces possibilités semblent devoir faire préférer la ventilation mécanique à la dalle pleine en plancher lorsqu'on ne prévoit qu'une seule amélioration.

III. Au chapitre D, on a vu que, *dans les écoles lourdes traditionnelles* au cours d'une année moyenne, si on laisse les fenêtres entrouvertes, la température intérieure, ne dépasse pas en principe 25° à Paris et 29° à Montpellier.

En fait, dans la région parisienne, les protections solaires des lycées traditionnels sont souvent médiocres et les fenêtres sont grandes ouvertes pendant l'été. Les températures intérieures y dépassent assez souvent 25°. Par contre, dans le Midi, il est courant de prévoir de très bonnes protections et la limite de 29° est en général respectée.

On voit donc que, *pour avoir un confort équivalent à celui régnant en été dans les écoles traditionnelles,* il suffit *à Paris de prévoir une seule amélioration* (ventilation mécanique ou dalle pleine) et il faut *dans le Midi apporter deux améliorations* (ventilation mécanique et dalle pleine).

Si les possibilités de *l'humidification* de l'air correspondent aux résultats de notre étude préliminaire, il se peut qu'il suffise, dans certaines régions du Midi, pour obtenir le même résultat, de prévoir simplement une ventilation mécanique accompagnée d'un système humidificateur, sans augmenter l'inertie du bâtiment.

IV. En ce qui concerne *le prix de fonctionnement de la ventilation mécanique,* si l'on dispose du tarif vert (MT) de l'EDF, l'ordre de grandeur des dépenses pour une classe, pendant une année moyenne, est le suivant :

— à Paris :
  17 francs sans humidification,
  22 francs avec humidification,

— à Montpellier :
  34 francs sans humidification,
  44 francs avec humidification.

Le prix d'investissement de la ventilation mécanique est difficile à apprécier. Cependant, l'installation peut être utilisée pour assurer à toute époque de l'année un apport important d'air neuf. En assurant ainsi une ventilation permanente abondante, on améliore sensiblement le confort et l'hygiène, été comme hiver, la ventilation naturelle, fenêtres fermées, étant le plus souvent insuffisante.

Il est alors normal de lier le chauffage à la ventilation. Un chauffage à air chaud convenablement réalisé a des qualités de souplesse tout à fait adaptées aux bâtiments de faible inertie thermique. Avec une régulation soignée, il peut être très confortable et économique (il permet en effet facilement un chauffage discontinu, c'est-à-dire uniquement pendant les heures d'occupation).

Enfin, si l'on assure à toute époque de l'année un apport important d'air neuf, il est peut-être possible d'abaisser la hauteur sous plafond et de réduire ainsi le prix de construction de l'immeuble.

ANNEXE I

Détermination de la courbe de température intérieure dans une classe ayant une certaine inertie thermique

L. BERTOLO, ingénieur au CSTB

On a utilisé la méthode de calcul manuel décrite dans le cahier 608. Cette méthode, assez approchée, n'est possible qu'en supposant la ventilation constante nuit et jour. Les calculs ont été faits en prenant un renouvellement d'air constant de 10 volumes/heure en ventilation naturelle et de 20 volumes/heure en ventilation mécanique.

Il y a là un gros écart avec la réalité. En effet, dans les écoles ventilées naturellement, les fenêtres sont grandes ouvertes le jour, quand il y a cours, mais sont fermées quand les classes sont inoccupées notamment la nuit. D'où un renouvellement d'air de 10 volumes/heure pendant l'occupation de jour et de 1 volume/heure en dehors de cette période.

De même, la ventilation mécanique ne fonctionne que quand les classes sont occupées, avec un renouvellement d'air de 20 volumes/heure. Quand la ventilation mécanique est arrêtée et que les fenêtres sont fermées, le renouvellement d'air n'est plus que de 1 volume/heure.

Les calculs manuels sont donc trop favorables car ils donnent trop d'importance au refroidissement nocturne de l'intérieur des bâtiments.

Pour corriger cette approximation, on a fait quelques calculs en analogie électrique en reproduisant exactement les conditions d'occupation. On en a tiré, pour les cas étudiés, un supplément de température à ajouter aux résultats du calcul manuel.

On a enfin admis, pour les différentes versions d'écoles légères améliorées, que les écarts entre leurs températures intérieures maximales étaient ceux donnés par le calcul manuel et que les écarts entre les températures maximales intérieures et le maximum de température extérieure météo étaient ceux donnés par le calcul manuel majorés du supplément de température trouvé pour les quelques cas étudiés en analogie électrique.

Au paragraphe I, est donné un exemple de calcul manuel ; au paragraphe II, sont décrits les calculs par analogie électrique et au paragraphe III sont comparés les résultats obtenus par les deux méthodes.

I. Calcul manuel approché

On se propose de traiter le cas d'une classe exposée au Sud, à Paris, ayant un plancher constitué par une dalle de béton de 10 cm, dans l'hypothèse de la ventilation naturelle (N = 10), puis de la ventilation mécanique (N = 20), le taux de ventilation étant constant nuit et jour. La façade est de la qualité actuellement adoptée *p*.

1. Données du problème

1,1. Conditions extérieures

Les conditions extérieures sont périodiques et sont celles du chapitre C (p. 23).

La *température extérieure météo* oscille de 14 à 26°. On la suppose sinusoïdale et donnée par la formule

$$T_{E\ Météo} = 20 + 6 \cos \frac{2\pi}{24} (\theta - 15)$$

θ = heure solaire, l'origine étant à 0 heure.

Devant la façade ensoleillée échauffée par le soleil, on a pris une température *te* donnée par

$$t'e = T_{E\ Météo} + 0{,}5 + 0{,}5 \cos \frac{2\pi}{24} (\theta - 12)$$

qui donne un supplément de 1° à midi, au moment du maximum d'ensoleillement. On a encore :

$$t'e = 20{,}5 + 6{,}3 \cos \frac{2\pi}{24} (\theta - 14{,}8)$$

On a décomposé *le rayonnement solaire* en série de Fourier. Le rayonnement solaire sur une exposition sud est donné par

$$R = 100 - 220 \cos \frac{2\pi}{24} \theta + 100 \cos \frac{4\pi}{24} \theta - 30 \cos \frac{6\pi}{24} \theta$$

1,2. Flux dû aux élèves

Pour une occupation de 7 h à 15 h 30 le flux de chaleur dégagé par les élèves, décomposé en série de Fourier, est

$$\Phi_{élèves} = 500 - 900 \cos \frac{2\pi}{24} (\theta + 1) + 400 \cos \frac{4\pi}{24} (\theta + 1) + 200 \cos \frac{6\pi}{24} (\theta + 1)$$

1,3. Inertie

La dalle de béton de 10 cm en plancher absorbe de la chaleur par sa face inférieure et sa face supérieure.

Le flux absorbé par la dalle s'écrit :

$$\Phi_I = h_i (t_i - t_s)$$

où t_i est la température de l'air intérieur, et t_s la température de surface de la paroi.

On suppose que toutes les autres parois du local sont à la température t_i. En fait, il n'en est pas ainsi et il convient d'analyser de plus près les équations d'échanges. Ceux-ci sont de deux sortes :

a) Les échanges par convection entre l'air et la paroi, qui sont égaux à :

$$h_c (t_i - t_s)$$

où h_c est le coefficient d'échange par convection.

On a pris h_c = 5 kcal/h . m². °C des deux côtés de la dalle, chiffre correspondant à la légère convection forcée que provoquent la ventilation naturelle ou la ventilation mécanique.

b) Les échanges par rayonnement entre la dalle et les autres parois du local, qui sont égaux à :

$$h_r (t_r - t_s)$$

où h_r est le coefficient d'échange par rayonnement et t_r la température radiante pour la dalle égale à la somme des températures des autres parois affectées des facteurs d'angle relatifs correspondants.

La somme des échanges est donc égale à :

$$h_c (t_i - t_s) + h_r (t_r - t_s)$$

qui peut s'écrire :

$$\left[h_c + h_r \frac{t_r - t_s}{t_i - t_s}\right] (t_i - t_s)$$

Cela signifie que les échanges sont égaux à ceux qui auraient lieu si les autres parois étaient à la température t_i le coefficient d'échange superficiel ayant une valeur fictive

telle que $$h_i' = h_c + h_r \frac{t_r - t_s}{t_i - t_s}$$

ou encore $$h_i' = h_c + h_r'$$

avec $$h_r' = h_r \frac{t_r - t_s}{t_i - t_s}$$

Les facteurs d'angle sont les suivants :

0,48 entre les deux dalles en plancher et en plafond,

0,15 de la façade vers la dalle,

0,37 pour les parois verticales intérieures légères vers la dalle.

Les surfaces inférieures et supérieures des deux dalles sont à la même température ; les parois verticales intérieures légères sont pratiquement à la température de l'air t_i.

On a $$t_r = 0{,}37\ t_i + 0{,}48\ t_s + 0{,}15\ t_f$$

où t_f est la température intérieure moyenne de la façade.

ou encore $t_r - t_s = 0\ 37\ (t_i - t_s) + 0{,}15\ (t_f - t_s)$

On a pris $t_f - t_s = 2\ (t_i - t_s)$

c'est-à-dire que $t_r - t_s = 0{,}67\ (t_i - t_s)$

En prenant $h_r = 4{,}5$ kcal/m².h. °C, le h_r' fictif est donc donné par

$$h_r' = 0{,}67\ h_r = 3 \text{ kcal/m}^2\text{.h. °C.}$$

On a donc fait les calculs avec un coefficient superficiel fictif h_i' égal à 8 pour les faces supérieure et inférieure de la dalle.

La température de l'air intérieur t_i est donnée par

$$t_i = t_{i\,\text{moy}} + E_i \cos \frac{2\pi}{24} (t - \varphi_i)$$

$t_{i\,\text{moy}}$: température intérieure moyenne,

E_i : demi-amplitude de l'onde de température intérieure,

φ_i : déphasage de cette onde.

La température de surface de la dalle est donnée par :

$$t_s = t_{i\,\text{moy}} + \alpha E_i \cos \frac{2\pi}{24} (t - \varphi_i - \psi_i)$$

où α est le coefficient d'amortissement et ψ_i le déphasage donnés par les figures 10, page 27 du cahier 608.

Pour une dalle de béton de 10 cm et un h_i de 8 on a :

$$\alpha = 0{,}70$$
$$\psi_i = 2 \text{ h } 30.$$

2. Flux intervenant dans le bilan thermique

2,1. Élèves

$$\Phi_{\text{élèves}} = 500 - 900 \cos \frac{2\pi}{24} (\theta + 1) + 400 \cos \frac{2\pi}{24} (\theta + 1) + 200 \cos \frac{6\pi}{24} (\theta + 1)$$

2,2. Apports dus au soleil au travers des baies vitrées

$\Phi_{s\,\text{vitre}} = s_{vi} S R$

s_{vi} = 13,5 m² surface des vitres

S = 0,15 facteur solaire

R = rayonnement solaire

$\Phi_{s\,\text{vitre}} = 2{,}02$

$$\left[100 - 220 \cos \frac{2\pi}{24} \theta + 100 \cos \frac{4\pi}{24} \theta - 30 \cos \frac{6\pi}{24} \theta\right]$$

2,3. Appports dus au soleil au travers des parois opaques

$$\Phi_{s\,\text{mur}} = K_{ms} s_{ms} \frac{\alpha R}{h_e}$$

s_{ms} = 10,75 m²

K_{ms} = 2,5

α = 0,75

h_e = 17

$\Phi_{s\,\text{mur}} = 1{,}35$

$$\left[100 - 220 \cos \frac{2\pi}{24} \theta + 100 \cos \frac{4\pi}{24} \theta - 30 \cos \frac{6\pi}{24} \theta\right]$$

2,4. Pertes au travers de la façade

$\varphi_{t\,\text{façade}} = S_f K_{f\,\text{moy}} [t_i - t_e']$

S_f = 26 m²

$K_{f\,\text{moy}}$ = 4

$\varphi_{t\,\text{façade}} = 104$

$$\left[t_{i\,\text{moy}} - 20{,}5 + E_i \cos \frac{2\pi}{24} (\theta - \varphi_i) - 6{,}3 \cos \frac{2\pi}{24} (\theta - 14{,}8)\right]$$

2,5. Pertes au travers de la cloison qui sépare la classe du couloir

$$\varphi_{t\,\text{cloison}} = S_{cl} K_{cl} [t_i - t_i'].$$

Le calcul de la page 20 de l'étude a donné

$$\varphi_{t\,\text{cloison}} = 41\ (t_i - T_{E\,\text{Météo}})$$

$\varphi_{t\,\text{cloison}} = 41$

$$\left[t_{i\,\text{moy}} - 20 + E_i \cos \frac{2\pi}{24} (\theta - \varphi_i) - 6 \cos \frac{2\pi}{24} (\theta - 15)\right]$$

2,6. Absorption par les dalles de béton

Le flux absorbé est donné par :

$\Phi_{\text{inertie}} = 2 s_p \times h_i (t_i - t_s)$

s_p = 60 m² surface du plancher

h_i = 8

$\Phi_{\text{inertie}} = 960$

$$\left[E_i \cos \frac{2\pi}{24} (\theta - \varphi_i) - 0{,}70\ E_i \cos \frac{2\pi}{24} (\theta - \varphi_i - 2{,}30)\right]$$

2,7. Flux évacué par la ventilation

En ventilation naturelle, ce flux est :

$\Phi_{n\,\text{vent}} = 0{,}3 \times N \times V [t_i - t_e']$

N = 10

V = 180 m³

$\Phi_{n\,\text{vent}} = 540$

$$\left[t_{i\,\text{moy}} - 20{,}5 + E_i \cos \frac{2\pi}{24} (\theta - \varphi_i) - 6{,}3 \cos \frac{2\pi}{24} (\theta - 14{,}8)\right]$$

En ventilation mécanique, le flux est :

$\Phi_{M\,\text{vent}} = 0{,}3\ NV\ [t_i - T_{E\,\text{Météo}}]$

N = 20

V = 180

$\Phi_{M\,\text{vent}} = 1\,080$

$$\left[t_{i\,\text{moy}} - 20 + E_i \cos \frac{2\pi}{24} (\theta - \varphi_i) - 6 \cos \frac{2\pi}{24} (\theta - 15)\right]$$

3. Équation du bilan thermique — Calcul de t_i

Le bilan s'écrit :

$$\Phi_{vent} + \Phi_{inertie} + \varphi_{t\ façade} + \varphi_{t\ cloison} = \Phi_{s\ mur} + \Phi_{s\ vitre} + \Phi_{élèves}$$

Cette équation comprend des termes constants et des termes sinusoïdaux.

Les termes constants donnent :

en ventilation naturelle $t_{i\,moy} = 21{,}7°$

en ventilation mécanique $t_{i\,moy} = 20{,}7°$

Les termes sinusoïdaux donnent, pour le premier harmonique :

en ventilation naturelle $E_i = 4{,}3°$

en ventilation mécanique $E_i = 4°$

Les harmoniques suivants ajoutent environ 0,5° dans le premier cas et un peu moins dans le deuxième.

Ce qui conduit comme température intérieure maximale

en ventilation naturelle, à $T_{i\,maxi} = 26{,}5°$,

en ventilation mécanique, à $T_{i\,maxi} = 25°$

pour une école comportant une dalle en plancher avec la qualité de façade actuelle *p*.

II. Calcul par analogie électrique

1. Principe

Cette méthode de résolution des problèmes thermiques repose sur l'analogie analytique entre : les lois de transmission de la chaleur et de l'électricité.

En effet, l'équation différentielle définissant la conduction de la chaleur est :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{c\rho}{\lambda} \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

et celle définissant la transmission de l'électricité dans un circuit de constantes réparties sans conductance transversale, ni self :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = RC \frac{\partial V}{\partial t}$$

Cette équation est analogue à la précédente si on assimile :

— la température θ au potentiel V

— la résistance thermique $\frac{1}{\lambda}$ à la résistance électrique R

— la capacité thermique ρ à la capacité électrique C.

En fait, la réalisation et l'utilisation en régime variable de milieux continus RC est très difficile. Aussi préfère-t-on l'utilisation des réseaux RC. On remplace ainsi un milieu continu par un milieu discontinu.

Du point de vue thermique, ceci revient à décomposer les éléments inertes en couches, chacune de celles-ci étant alors représentée par deux éléments :

— l'un, de même résistance thermique que la couche, auquel on fait correspondre une résistance électrique ;

— l'autre, de même capacité thermique, auquel on fait correspondre une capacité électrique.

La précision du résultat est bien entendu fonction du nombre de couches, ainsi que de la plus grande fréquence liée au problème.

L'avantage de cette méthode est :

— qu'elle ne nécessite pas les hypothèses qu'il est nécessaire d'admettre dans le calcul analytique ; on peut, par exemple, introduire un flux thermique dans le local (flux des élèves) ou modifier le taux de ventilation à une heure bien déterminée,

— et qu'il n'est pas nécessaire de décomposer les données en série de Fourier.

2. Description. Réalisation

Grandeurs électriques et grandeurs thermiques sont reliées entre elles par des constantes de transposition. Dans ce problème ces constantes étaient les suivantes :

$$\frac{\text{temps électrique}}{\text{temps thermique}} = \frac{1}{24 \times 3\,600} = 1{,}16 \cdot 10^{-5}$$

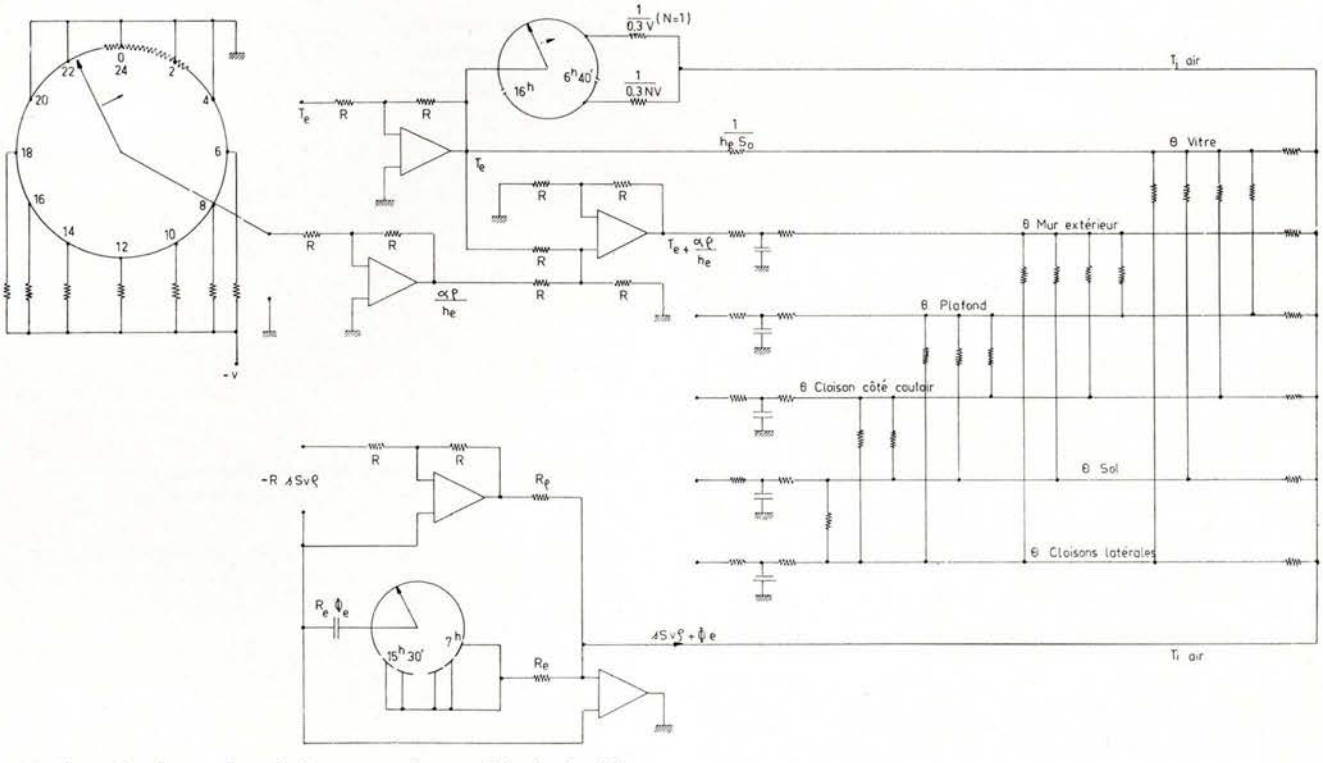
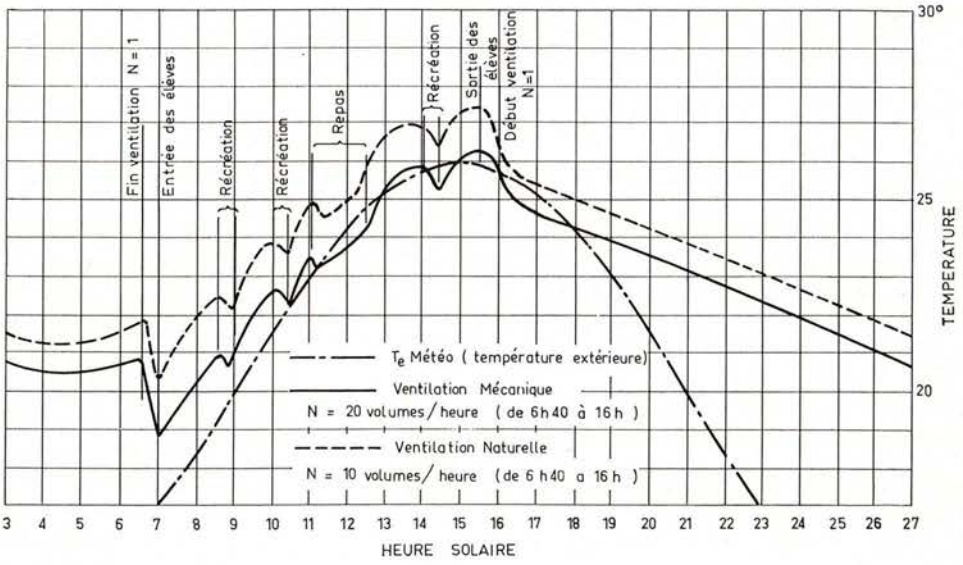


Schéma du réseau de calcul pour représenter l'école étudiée.



Écoles semi-lourdes (EL). Exposition Sud.

1. seconde électrique correspondant à 1 journée thermique.

$$\frac{\text{capacité électrique}}{\text{capacité thermique}} = 3{,}33 \cdot 10^{-12}\ \text{F/(J/kg . °C)}$$

$$\frac{\text{résistance électrique}}{\text{résistance thermique}} = 3{,}47 \cdot 10^{6}\ \Omega\text{/(m . °C/W)}$$

$$\frac{\text{différence de potentiel}}{\text{différence de température}} = 0{,}24\ \text{V/°C}$$

$$\frac{\text{courant électrique}}{\text{flux thermique}} = 0{,}069 \cdot 10^{-6}\ \text{A/W}$$

la figure de la page 43 montre le réseau réalisé pour représenter l'école étudiée; en voici, sommairement décrits, les différents éléments :

2,1. Réseau de calcul

2,11. Parois

Elles sont représentées par l'association en série de plusieurs réseaux en T (association de deux résistances de part et d'autre d'une capacité) dont un seul est figuré sur le schéma. Un réseau en T correspond par exemple à une couche de béton de 5 cm.

2,12. Résistances thermiques superficielles à l'intérieur du local

Les échanges de chaleur à l'intérieur du local ont été décomposés en échanges de chaleur par rayonnement et par convection. Ainsi chaque résistance électrique représente, soit la résistance thermique correspondant aux échanges de chaleur par rayonnement entre deux parois, soit la résistance thermique correspondant aux échanges de chaleur par convection entre l'air et une paroi.

2,2. Génération des données

Les données extérieures (température, ensoleillements) sont obtenues à partir de potentiomètres multiprises; leurs curseurs sont fixés sur un même axe entraîné par un moteur synchrone. Chaque prise est alimentée en tension continue par des résistances raccordées soit à une source de tension fixe, soit à la masse. Ces résistances ont été calculées de façon telle que le potentiel des prises corresponde aux valeurs de la grandeur considérée aux différentes valeurs du temps. L'exploration du potentiel de ces prises au cours du temps fournit une tension variable représentant alors cette grandeur.

Les lois à variations brusques (entrée et sortie des élèves de la salle de classe, variation de la ventilation) sont obtenues à l'aide de commutateurs fixés sur le même axe que les potentiomètres.

Des amplificateurs opérationnels sont utilisés comme adaptateurs d'impédances entre le système d'entrée des données et le réseau de calcul et aussi pour obtenir des sources de courant (flux solaires, flux des élèves).

2,3. Mesures des températures

Les températures de surfaces des différentes parois et de l'air de la classe sont obtenues en mesurant les tensions aux points correspondants. Les variations de ces tensions en fonction du temps sont fixées sur papier photographique au moyen d'un enregistreur rapide.

On trouvera reproduits sur la figure ci-dessus des exemples d'enregistrements de températures d'air dans les conditions suivantes : cas de l'inertie I (c'est-à-dire plancher dalle pleine), en ventilation naturelle (N = 10) et en ventilation mécanique (N = 20), avec la qualité actuelle de façade.

On trouve comme température intérieure maximale :

27,5° en ventilation naturelle,

26,2° en ventilation mécanique.

III. Comparaison entre les résultats obtenus par le calcul manuel et par le calcul analogique

L'analogie électrique donne une température intérieure maximale un peu supérieure à celle calculée manuellement. L'écart est de 1° en ventilation naturelle et de 0,5° en ventilation mécanique.

Ces suppléments de température proviennent essentiellement de ce que l'on n'a pas tenu compte dans le calcul manuel de l'arrêt de la ventilation la nuit.

On a donc, quand il y a inertie, majoré toutes les températures intérieures maximales calculées manuellement de 1° en ventilation naturelle et de 0,5° en ventilation mécanique.

ANNEXE II

Fréquence des températures intérieures maximales à Paris et à Montpellier dans les écoles légères, avec et sans amélioration

On a déterminé d'abord les écarts entre les maximums de température intérieure et les maximums de température extérieure météo un jour d'ensoleillement continu et un jour d'ensoleillement discontinu ou nul. Puis, à l'aide des fréquences des couples « température extérieure météo maximale et durée d'ensoleillement », on a établi les fréquences des températures maximales intérieures.

I. Ensoleillement continu

1. Ecoles très légères sans amélioration

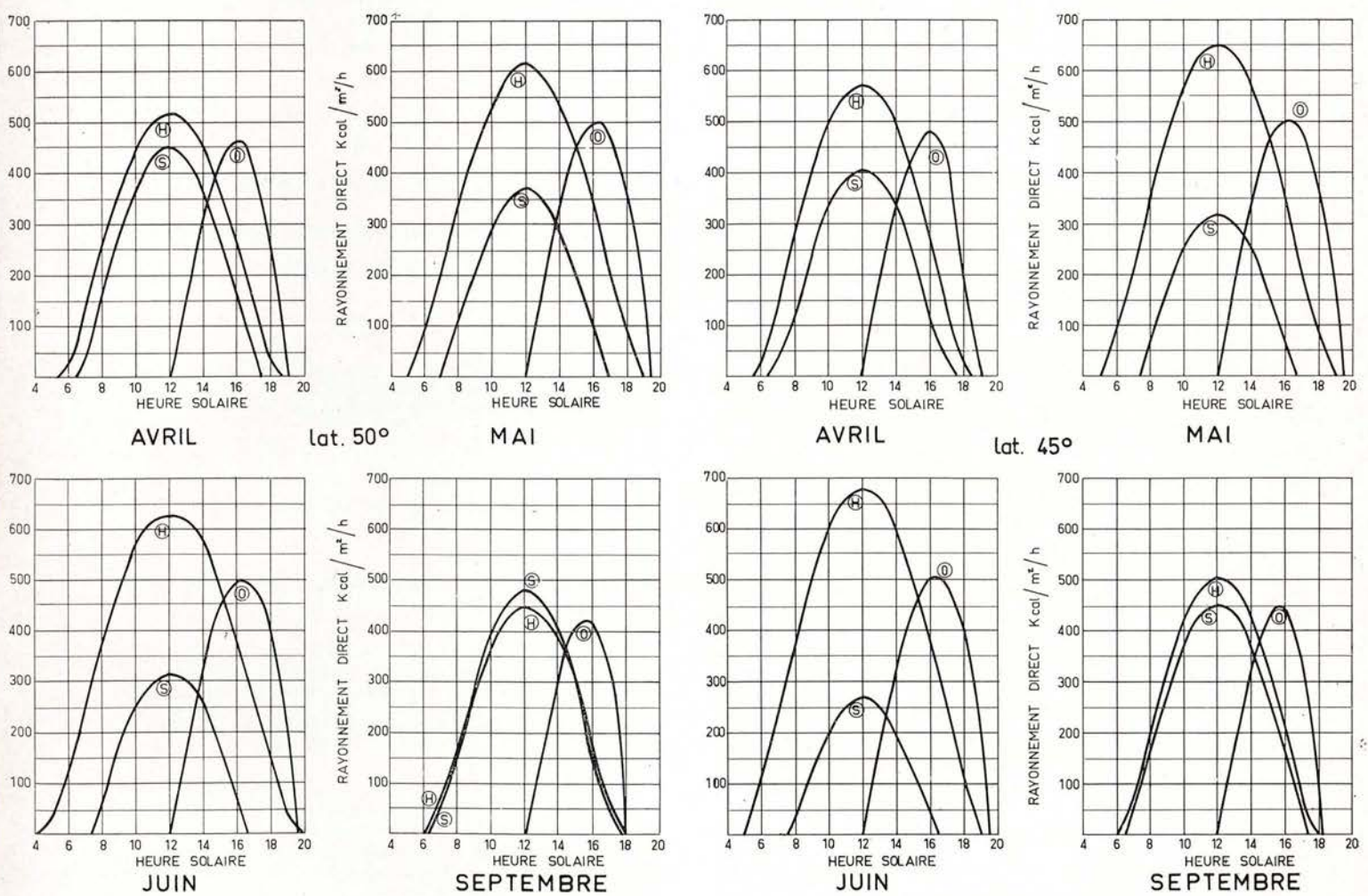
En l'absence de tout apport, les températures extérieures et intérieures sont égales à chaque instant. Le supplément de température dû aux élèves est d'environ 2°.

1,1. Sur les façades exposées au *Nord* et à l'*Est*, au moment du maximum de température intérieure, il n'y a pas de rayonnement direct ; par contre, le rayonnement diffus provenant du ciel et du sol provoque une élévation de température d'environ1° lorsque les stores sont relevés.

Pour ces expositions Est et Nord, quels que soient l'époque de l'année et l'endroit, la température intérieure maximale est à 3° au-dessus de la température extérieure météo maximale.

1,2. Pour les expositions *Ouest* et *Sud* la façade est ensoleillée au moment du maximum de température intérieure. Les figures ci-dessous donnent le rayonnement direct tombant sur les façades O, S et sur un plan horizontal pendant les différents mois de l'année scolaire, avril, mai, juin, septembre aux latitudes 50° et 45°.

1,21. On voit que l'ensoleillement varie peu à l'*Ouest*. Avec le rayonnement diffus on a pratiquement un rayonnement solaire total maximal de 600 kcal/m².h pour chacun de ces mois et à chacune de ces latitudes, le maximum d'ensoleillement coïncidant avec le maximum de température intérieure (16 heures).



Rayonnement direct tombant sur les façades Ouest, Sud et sur un plan horizontal.

	Latitude 50°				Latitude 45°			
	A	M	J	S	A	M	J	S
$R_{Total\ maxi}$	580	510	450	570	550	470	420	570
$t_i - T_{E\ Météo\ maxi}$	5°8	5°5	5°3	5°7	5°8	5°4	5°	5°7

Pratiquement, la température intérieure maximale est à 6° au-dessus de la température extérieure météo maximale pour une exposition Ouest quels que soient le mois et le lieu.

1,22. Il n'en est pas de même au *Sud* où le rayonnement solaire direct varie considérablement comme l'indiquent les figures *c* et *d*.

Le rayonnement total tombant sur la façade est la somme du rayonnement direct (R_D) du rayonnement diffusé par le ciel ($R_{d\ ciel}$) et du rayonnement réfléchi par le sol ($R_{d\ sol}$), soit

$$R_{Total} = R_D + R_{d\ ciel} + R_{d\ sol}$$

R_D est donné par les courbes des figures *c* et *d*

$R_{d\ ciel}$ à midi varie de 50 à 60 kcal/m².h suivant la hauteur du soleil.

$$R_{d\ sol} = \frac{R_H \cdot \rho_{sol}}{2}$$

où R_H est le rayonnement total tombant sur un plan horizontal (fig. *c* et *d*).

ρ_{sol} facteur de réflexion du sol que nous prendrons égal à 0,3.

Le tableau ci-dessous donne les rayonnements totaux maximaux dans les différents cas et les écarts maximaux $t_i - T_{E\ Météo}$ correspondant au maximum d'ensoleillement, ces écarts tenant compte des apports dus aux élèves.

Cela donne, pour l'exposition Sud, les écarts suivants entre la température intérieure maximale et la température extérieure météo maximale (écarts arrondis au demi-degré) :

Latitude 45°				Latitude 50°			
A	M	J	S	A	M	J	S
4°5	4°5	4°	4°5	4°5	4°	3°5	4°5

2. Écoles améliorées

On suppose que l'écart diurne extérieur météo est de 12°, ce qui est vrai en moyenne.

Dans ces conditions, à un demi-degré près, une *amélioration simple* (ventilation mécanique EIVM ou dalle pleine ELVn) diminue de moitié les chiffres précédents. Et, pour toutes les expositions, une *amélioration double* (ELVM) amène la température intérieure maximale au niveau de la température extérieure météo maximale.

II. Ensoleillement discontinu ou nul

Les chiffres précédents correspondent à un ensoleillement continu.

Les suppléments de température intérieure Δt_{is} dus au rayonnement solaire direct y sont pratiquement donnés dans les écoles très légères par

$$\Delta t_{is} = \Delta t_i - 2°$$

Δt_i désignant les écarts entre les températures maximales intérieure et extérieure météo donnés ci-dessus, les 2° correspondant aux apports dus aux élèves.

Lorsque le soleil est caché pendant la journée, on admet que le rayonnement diffus provoque une élévation de température intérieure de 1°, soit que le store soit relevé si le rayonnement est faible, soit qu'il soit baissé dans le cas contraire.

Un jour couvert sans soleil, on a donc pris, pour toutes les expositions, un écart de 3° entre les températures maximales intérieure et extérieure météo.

Pendant une journée nuageuse d'ensoleillement discontinu, l'écart $\Delta' t_i$ entre les températures maximales intérieure et extérieure météo est compris entre ces 3° et les Δt_i du paragraphe précédent.

$$\Delta t_i > \Delta' t_i > 3°$$

Δt_i correspondant à l'ensoleillement continu.

$\Delta' t_i$, à l'ensoleillement discontinu.

3°, à l'ensoleillement nul.

On a pratiquement :

$$\Delta' t_i = (\Delta t_i - 3°) \cdot \frac{I'}{I} + 3°$$

I' : ensoleillement direct reçu par la façade, le jour considéré où l'ensoleillement est discontinu.

I : ensoleillement direct reçu par la façade un jour d'ensoleillement continu.

En moyenne, on a :

$$\frac{I'}{I} = \frac{d'}{d}$$

d' : durée d'ensoleillement le jour considéré, où l'ensoleillement est discontinu.

d : durée d'ensoleillement un jour d'ensoleillement continu à l'époque considérée.

On peut donc écrire :

$$\Delta' t_i = (\Delta t_i - 3°) \cdot \frac{d'}{d} + 3°$$

En supposant toujours que l'amplitude de la variation diurne de la température extérieure météo est de 12°, on a pris comme écart, pour une *amélioration simple*,

$$\frac{\Delta t_i'}{2}$$

et pour une *amélioration double*, on a pris un écart nul.

III. Fréquence des températures intérieures maximales

On a utilisé les données quotidiennes de température extérieure météo maximale et de durée d'ensoleillement pendant les cinq années de 1946 à 1950, à Paris et à Montpellier.

On a pris chaque température au-dessus de 20° des mois d'avril, mai, juin, septembre et pointé la durée d'ensoleillement correspondante.

A l'aide d'une série de tableaux on a alors établi les fréquences des couples « température extérieure maximale, et durée d'ensoleillement ». A chaque durée d'ensoleillement, correspond un écart entre température intérieure maximale et température extérieure météo maximale donné au paragraphe précédent. En ajoutant à chaque température extérieure maximale l'écart correspondant, on a établi les fréquences

cumulées des températures intérieures maximales données par les courbes des figures 27 à 32 et les tableaux III et IV du chapitre D. Pour supprimer les jeudis et les dimanches, on a pris les 5/7 des fréquences totales.

Les figures 27 à 32 correspondent en fait à une année moyenne. La période 1946 à 1950 a été en effet exceptionnellement chaude à Paris, la température extérieure maximale de base pour cette période est à 3° au-dessus de la température de base correspondant aux quarante années de la période 1891-1930. Pour Montpellier, les températures de base de ces deux périodes 1946 à 1950 et 1891 à 1930 coïncident (cf. cahier 608, p. 22).

Pour ramener les données à une année moyenne on a, à Paris, réduit de 3° la température maximale intérieure correspondant à la période 1946 à 1950.

Rappelons que pour établir ces courbes deux hypothèses ont été faites :

— d'une part on a admis que l'écart diurne était toujours de 12° ;

— d'autre part on a admis que

$$\frac{I'}{I} = \frac{d'}{d}$$

Ces hypothèses sont vraies en moyenne et inexactes certains jours. Elles conviennent donc statistiquement pour établir des fréquences cumulées.

ANNEXE III

Étude des possibilités d'amélioration du confort thermique par humidification de l'air en saison chaude à Paris et à Montpellier

Le maximum de température extérieure sèche a lieu aux environs de 15 heures. La tension de vapeur d'eau en millibars est donnée par la Météorologie nationale, depuis 1958, toutes les trois heures chaque jour et en particulier à 15 heures ; on en a tiré le poids d'eau en grammes par kilogramme d'air sec et l'on a admis qu'au moment du maximum de température extérieure sèche, le poids d'eau dans l'air était celui mesuré à 15 heures, ce qui est très proche de la réalité.

On a déterminé la fréquence des couples « température extérieure sèche maximale et poids d'eau dans l'air » à 15 heures, pendant les cinq années 1958 à 1963.

Les courbes I des figures 31 et 32 donnent les fréquences cumulées des température effectives extérieures maximales.
A chaque couple « température sèche extérieure maximale et poids d'eau dans l'air » correspond, sur le diagramme psychrométrique (fig. 20), un point A et une température effective.

A chaque point A représentant l'air extérieur, correspond un point B représentant l'air soufflé par un humidificateur. Ce point B est fixé par le rendement d'humidification r_h de l'appareil défini ainsi : si B′ est le point figuratif correspondant à l'air soufflé s'il était saturé d'eau (B′ est à l'intersection de la température humide de A et de la courbe d'hygrométrie 100 %), les trois points ABB′ sont alignés et le rendement d'humidification r_h est :

$$r = \frac{AB}{AB'}$$

On a pris, pour définir B, un rendement d'humidification r_h de 0,85 correspondant aux meilleurs appareils humidificateurs existant sur le marché.

L'air soufflé B est échauffé par les apports dans le local, dont l'air intérieur est représenté par le point C. On a pris 3,5° comme écart de température sèche entre B et C ce qui correspond à une classe exposée à l'Ouest (ou au Sud sous toiture) pendant une journée d'ensoleillement continu. Ces 3,5° sont un écart maximal ; les jours d'ensoleillement discontinu ou nul, l'écart est en effet plus faible. La température effective du point C constitue donc une limite supérieure de la température effective intérieure.

On a fait correspondre à chaque point A représentant l'air extérieur un point C ainsi calculé.

Les courbes II des figures 31 et 32 donnent pour chaque ville les fréquences de ces limites supérieures de températures effectives à l'intérieur d'une classe très légère ventilée avec de l'air humidifié et exposé à l'Ouest (ou au Sud sous toiture). En abscisse, en regard des températures effectives, sont portées les températures sèches correspondant à un poids de 10 grammes d'eau par kilogramme d'air sec.

Revue bibliographique d'études étrangères sur le confort hygrothermique et la ventilation dans les écoles

G. GUIBERT, ingénieur au CSTB

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE D'ÉTUDES ÉTRANGÈRES SUR LE CONFORT HYGROTHERMIQUE ET LA VENTILATION DES SALLES DE CLASSE

Liste des études examinées 48
I. Le confort d'été 49
1. Importance du problème 49
2. Influence de l'inconfort thermique sur le travail scolaire 49
3. Les conditions du confort thermique. Influence du degré hygrométrique de l'air 50
II. La ventilation 52
1. Taux de renouvellement observés avec différents systèmes de ventilation 52
2. Estimation des besoins en air frais 52
3. Influence sur l'hygiène et le développement des maladies 53
III. Le chauffage 53
IV. La hauteur sous plafond 54

Liste des études examinées

Le problème du confort hygrothermique et de la ventilation dans les locaux scolaires modernes, notamment en période chaude, est à l'ordre du jour et a fait l'objet de publications récentes dans plusieurs pays, même sous des climats aussi doux en été que ceux des pays scandinaves. Voici la liste des études examinées, qui émanent pour la plupart d'instituts nationaux :

Suède

Institut National de Recherche du Bâtiment
(Statens Institut for Byggnadsforskning) à Stockholm

(1) Rapport fran Byggforskningen n° 30 de 1967 : « Mesures de climat dans des écoles ».

(2) Rapport fran Byggforskningen n° 31 de 1967 : « Opinion des professeurs sur le climat des salles de classe (enquête par questionnaire) ».

(3) Rapport fran Byggforskningen n° 33 de 1968 : « Consommation de chaleur enregistrée dans les écoles » par S. Mandorff.

(4) Rapport fran Byggforskningen n° 48 de 1968 : « Prestations scolaires à des températures élevées » par Löfstedt, Ryd et Wyon.

Institut de Psychologie et de Pédagogie
(Pedagogisk-Psykologiska Institutionen) à Malmö :

(5) Rapport n° 45 d'octobre 1967 : « Relation entre les performances scolaires et la température des salles de classe » par Holmberg et Wyon.

Danemark

Institut National de Recherche du Bâtiment
(Statens Byggeforsknings Institut) à Copenhague :

(6) Rapport n° 57 de 1966 : « Climat intérieur dans les écoles » par Andersen et Lundqvist.

Norvège

Institut Norvégien de Recherche du Bâtiment
(Norges Byggforsknings Institut) à Oslo :

(7) Rapport n° 47 de 1966 : « Surchauffe et ventilation dans les écoles » par Myklebost, résumé en français paru dans le n° 3 de Build (cahier du CSTB n° 842).

Afrique du Sud

Institut National de Recherche du Bâtiment
(National Building Research Institute) à Prétoria :

(8) Rapport n° 203 de 1965 : « Considérations de ventilation et de thermique dans la conception des écoles » par Van Straaten, Richards, Lotz, et Van Deventer.

U.S.A.

Kansas State University

(9) ASHRAE transactions, volume 73 de 1967 : « Confort et progrès scolaires dans une école (junior high school) à air conditionné. Une évaluation sommaire de l'expérience de Pinellas » par Mc Nall et Nevins.

Nous donnons ici une synthèse des résultats les plus marquants de ces études en les groupant sous quatre rubriques : le confort d'été, la ventilation, le chauffage, la hauteur sous plafond, et en montrant quelles réponses à nos préoccupations on peut en tirer.

Rappelons quelles sont ces préoccupations :

1° Pour le confort d'été

Une des principales conclusions de l'étude publiée en tête de ce cahier est qu'une solution pour assurer un bon confort d'été dans les constructions scolaires légères est d'amener un très fort débit d'air dans les salles de classe (environ 20 fois le volume de la classe par heure) en le refroidissant éventuellement par une évaporation d'eau. On abaisse ainsi notablement la température sèche de l'air intérieur, mais en augmentant le degré hygrométrique. Quelle conséquence sur le confort provoque cet accroissement du degré hygrométrique? Au-dessous de quelle température faut-il descendre pour qu'il n'y ait pas de perturbation du travail des élèves?

2° Pour la ventilation

Si l'on adopte une ventilation mécanique pour réaliser le confort d'été, il est raisonnable d'utiliser l'installation à toute époque de l'année. Quelle amélioration pour le confort et pour l'hygiène peut-on en attendre? Quel débit d'air faut-il souffler pendant les périodes où ne se pose pas le problème de confort d'été?

3° Pour le chauffage

Lier le chauffage à l'air soufflé est une conséquence logique de l'existence d'une amenée d'air mécanique fonctionnant en permanence. Que peut-on attendre d'une telle association du point de vue du confort, de la régulation, des dépenses d'exploitation?

3° Pour la hauteur sous plafond

Si un renouvellement d'air abondant est assuré en permanence, peut-on envisager de diminuer le volume du local en abaissant la hauteur sous plafond?

Dans l'analyse qui suit, on se réfère non seulement aux études dont la liste est donnée ci-dessus et qui concernent des recherches récentes propres aux écoles, mais aussi à des études générales sur le confort thermique et à des études déjà anciennes sur les problèmes de confort dans les écoles. En voici la liste :

U.S.A.

Harvard school of public health

(10) American journal of public health, février 1956 : « État actuel de la ventilation sanitaire dans les écoles » par Yaglou.

Kansas State University — Laboratoire de l'ASHRAE

(11) ASHRAE transactions, volume 66 de 1960 : « Réactions subjectives à la température et à l'humidité en air calme dans la zone de confort » par Koch, Jennings et Humphreys.

Kansas State University — Laboratoire de l'ASHRAE

(12) ASHRAE transactions, volume 72 de 1966 : « Abaque température-humidité pour le confort thermique de personnes assises » par Nevins, Rohles, Springer et Feyerherm.

Kansas State University

(13) ASHRAE transactions, volume 73 de 1967 : « Calcul du confort thermique — Introduction d'une équation de base du confort » par Fanger.

(14) HS Belding et TF Hatch :

« Indice pour évaluer la contrainte thermique en fonction des tensions physiologiques qui en résultent. »

Heating, Piping, Air Conditioning, août 1955.

Israël

Station de Recherche du Bâtiment — Technion à Haïfa

(15) Rapport de recherche par l'UNESCO, 1963 : « Estimation de l'effet du climat sur l'homme — Développement d'un nouvel indice thermique » par Givoni.

Divers

(16) Conférences faites aux journées de Chauffage, Ventilation et Conditionnement de l'air à Paris en 1959, publiées dans le n° 169, d'octobre 1959 des Annales de l'I.T.B.T.P.

I. Le confort d'été

1. Importance du problème

Des températures intérieures dépassant 30 °C ont été relevées dans les écoles de plusieurs pays, même sous des climats aussi doux en été que ceux des pays scandinaves.

Un rapport de l'Institut national suédois de recherche dans le bâtiment (étude n° 1) présente des enregistrements dans des bâtiments en bois où la température intérieure est à 10° au-dessus de la température extérieure (température intérieure de 25° à 31° au mois de mai pour une température extérieure de 15° à 21 °C). Ces résultats concordent avec ceux observés pendant une période ensoleillée, dans la région parisienne, à l'intérieur d'écoles légères dont les baies vitrées sont équipées de protections médiocres.

La figure 1, extraite de l'étude n° 2, publiée par le même Institut, donne des températures relevées en hiver et au printemps dans différentes écoles suédoises. On voit que des températures intérieures élevées ne s'observent pas qu'en été ; des surchauffes inconfortables peuvent se produire en période de chauffage, en particulier si la régulation ne tient pas compte des apports solaires ou des apports intérieurs dus aux élèves.

Des résultats analogues sont mentionnés aux U.S.A. (étude n° 9).

2. Influence de l'inconfort thermique sur le travail scolaire

Deux études suédoises (études n° 4 et 5) visent à déterminer directement l'influence de la température sur le rendement du travail scolaire au moyen de tests. Elles montrent que même des températures relativement modérées (27 °C) ont une influence

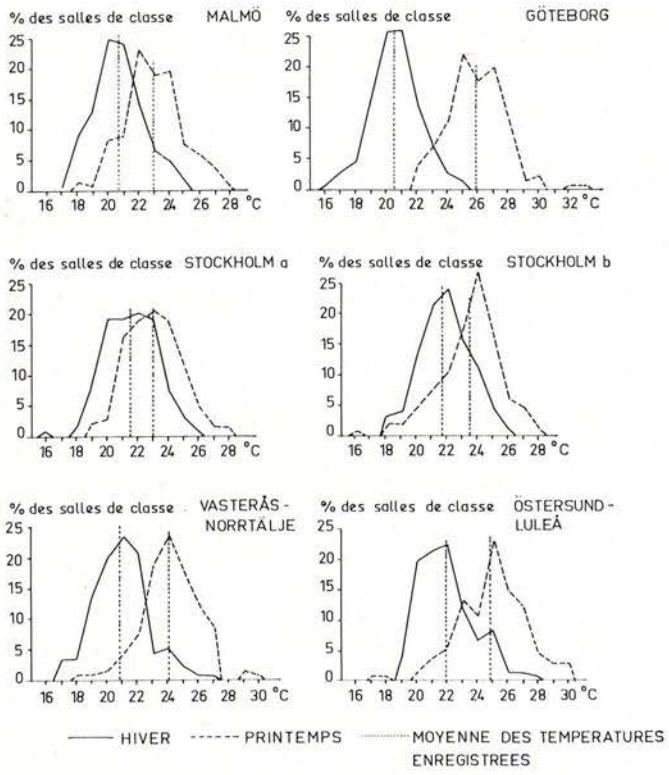


Figure 1

Températures enregistrées dans des salles de classe en Suède.

néfaste sur certaines activités : vitesse de lecture, compréhension des textes... Elles montrent aussi que ce sont les moins bons élèves qui sont le plus perturbés par une élévation de température. Dès à présent, il est possible de conclure que des températures supérieures à 27° doivent être évitées dans les salles de classe. Les auteurs poursuivent actuellement des études pour préciser l'influence de la température au-dessous de 27°.

Aux États-Unis, Mc Nall et Nevins (étude n° 9) ont tenté de voir si les élèves d'une école climatisée progressaient plus que ceux d'écoles non climatisées. La méthode utilisée consistait à mesurer les progrès scolaires par la différence des notes obtenues pour des tests standards (d'anglais, d'études sociales, de mathématiques et de sciences) au début et à la fin d'une année scolaire. Les températures et humidités étaient relevées en continu dans les différentes écoles. Dans l'école climatisée, la température variait de 21 à 26 °C environ alors que dans les autres elle variait de 21 à 30 °C environ. Le dépouillement statistique des résultats a permis de dégager « une forte tendance en faveur de l'école climatisée, mais non statistiquement significative ». Les auteurs concluent à la nécessité de poursuivre des recherches en contrôlant d'autres paramètres tels que les motivations des élèves, leur préparation antérieure, la personnalité des professeurs, les conditions socioéconomiques, etc.

3. Les conditions du confort thermique — Influence du degré hygrométrique de l'air

Des recherches sur les conditions de confort thermique sont menées depuis de très nombreuses années dans différents pays, notamment aux États-Unis.

La première échelle de confort utilisant la notion de température effective a été établie par Houghton et Yaglou, en 1923, d'après les réactions subjectives de nombreux sujets. Cette notion a été perfectionnée par plusieurs auteurs, dont certains ont même regroupé en un seul paramètre les diverses variables ayant une influence sur le confort (température sèche de l'air, degré hygrométrique de l'air, vitesse de l'air, température radiante de l'environnement) ; elle a été très largement utilisée pendant de nombreuses années sous le nom de température effective ou de température résultante. Ces premières définitions de la température effective donnaient une assez grande importance au degré hygrométrique ; mais les tests à partir desquels elles avaient été établies comportaient des temps de séjour assez courts et l'appréciation de la sensation de chaleur correspondait plutôt à une sensation de passage.

De nouvelles expériences faites à partir de 1947 ont montré que, pour un temps de séjour suffisamment long, dans une ambiance ayant des températures comprises entre 20 et 25° les variations d'humidité relative de 20 à 60 % affectent peu la sensation de confort de personnes au repos. Des précisions importantes ont été apportées par les recherches faites aux U.S.A. durant ces dix dernières années (études nos 11 et 12).

Sur la figure 2 sont tracées trois séries de courbes d'équiconfort pour des températures d'air et des degrés hygrométriques variables, l'air étant calme et la température radiante étant égale ou très voisine de la température d'air :

— la première série de courbes est celle donnée par le guide de l'ASHRAE depuis 1950 et souvent reproduite depuis par de nombreux auteurs, c'est elle qui est utilisée dans l'étude précédente.

— la seconde série est celle donnée par Koch, Jennings et Humphreys en 1960 (étude n° 11),

— la troisième série est celle donnée par Nevins, Rohles, Springer et Feyerherm en 1966 (étude n° 12).

La première série de courbes correspond à des sujets au repos sans autre précision, le temps de séjour dans l'ambiance considérée étant assez court. Les deux autres séries correspondent à des sujets légèrement vêtus, assis et au repos, le temps de séjour étant de plusieurs heures.

On constate que les deux dernières séries de courbes donnent très peu d'influence au degré hygrométrique dans la sensation de chaleur. L'explication en est sans doute la suivante : lorsque l'organisme trouve son équilibre thermique sans transpiration, l'humidité relative joue peu ; c'est le cas en-dessous de 25-30°. Dans des atmosphères plus chaudes où une transpiration plus ou moins abondante a lieu, l'humidité joue davantage, c'est notamment le cas des climats tropicaux humides.

Les études ci-dessus sont fondées sur les réactions subjectives des sujets. Plusieurs chercheurs, Belding et Hatch aux U.S.A., Givoni en Israël (études nos 14 et 15), ont cherché à se référer aux réactions physiologiques de l'organisme, notamment à la perte de poids par sudation. Les conclusions de ces études concordent avec celles des études américaines récentes citées plus haut qui étaient basées sur les réactions subjectives des sujets. Elles montrent que

l'incidence du degré hygrométrique sur la sensation de chaleur est négligeable tant qu'il n'y a pas sudation et qu'elle croît avec la température dès qu'il y a sudation. D'après Givoni, et pour un individu au repos, cette incidence commence, en air calme, à 26° à peu près et, pour une vitesse d'air de 50 cm/s, à 30° seulement.

Dans le même ordre d'idées, Fanger (étude n° 13) a récemment proposé une définition mathématique du confort thermique faisant intervenir en particulier les paramètres d'activité physique et d'habillement. Les courbes d'équiconfort obtenues par le calcul à partir de cette définition rejoignent d'assez près celles établies par Nevins, Rohles, Springer et Feyerherm.

Au Danemark, Andersen et Lundquist (étude n° 6) ont utilisé la mesure de la température de l'extrémité du doigt comme indicateur de l'équilibre

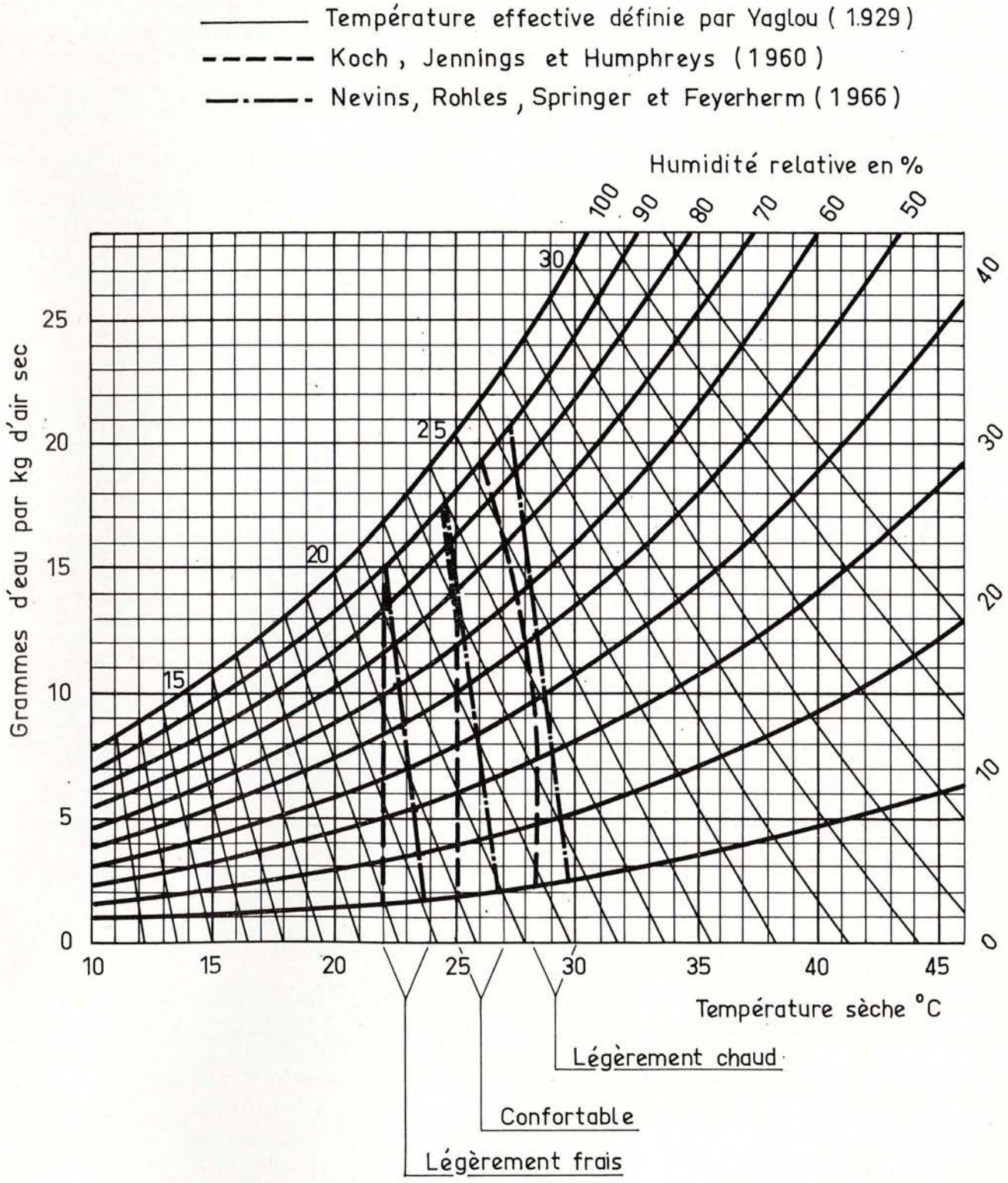


Figure 2
Courbes d'équiconfort.

thermique des élèves, la mesure étant faite dans des classes réelles. Ils ont trouvé que la dispersion de cette mesure diminue lorsque la température résultante augmente, et que les températures du doigt se resserrent autour de 33°/34° C. Ils ont déterminé que si la température résultante dépasse 24 °C, plus de 15 % des garçons (élèves de 17 ans) trouvent leur équilibre thermique par transpiration. Pour ces 15 %, on peut donc penser que le rôle de l'humidité dans la sensation de chaleur commence pour des températures un peu plus basses que celles indiquées plus haut.

Enfin, les études ci-dessus ne se réfèrent qu'à la sensation de chaleur, et certaines d'entre elles englobent des humidités relatives comprises entre 15 % et 85 %. Il est possible que d'autres facteurs interviennent à la longue pour les très basses et très hautes humidités (irritation de la gorge, gêne respiratoire) et on admet généralement qu'il faut rester entre 30 et 75 %.

On peut donc être optimiste sur les possibilités du refroidissement par évaporation d'eau pendant les périodes les plus chaudes de l'été en France. En effet, on obtient de bons résultats avec ce procédé même en restant au-dessous de 75 %.

II. La ventilation

1. Taux de renouvellement d'air observés avec différents systèmes de ventilation

Les résultats de mesures effectuées dans douze écoles suédoises (étude n° 1) sont les suivants :

— En ventilation naturelle, les taux horaires de renouvellement d'air observés vont de 0,4 à 0,9, correspondant à des débits de 3 à 5 m³/h par élève (la réglementation suédoise demande 15 m³/h !)

— En extraction mécanique, les résultats sont très dispersés : taux de 0,6 à 2,1 et débits de 4 à 22 m³/h par élève. Cette dispersion est principalement due au mauvais réglage de certaines installations ;

— En amenée d'air mécanique, avec ou sans extraction mécanique, on observe également une assez grande dispersion : 5,3 à 22 m³/h par élève.

En conclusion, l'étude met l'accent sur l'importance du réglage initial des installations et sur la nécessité de consignes d'entretien et d'utilisation.

L'étude suédoise n° 2 donne des chiffres analogues. On y trouve de plus les réponses des professeurs à une enquête qui a porté sur 50 écoles et plus de 1 000 professeurs.

A la question concernant la qualité de l'air à la fin des cours, les réponses diffèrent peu selon les types de ventilation. Seuls les appareils individuels (un appareil par classe) ont provoqué des réponses nettement plus favorables. Voici ces réponses :

	Qualité de l'air à la fin des cours		
	Frais	Pollué	Autres réponses
Ventilation naturelle et système centralisé d'extraction ou d'amenée d'air	20 %	60 %	20 %
Appareils individuels	60 %	20 %	20 %

Ce fait surprenant ne peut s'expliquer que par le mauvais fonctionnement des installations centralisées. Il est cependant certain que de bons résultats (au moins aussi bons que ceux obtenus avec les appareils individuels) peuvent être atteints avec ce type d'installations. Cela montre seulement que de grandes précautions doivent être prises aussi bien dans le calcul du réseau que dans le montage et l'exploitation du système.

La question de l'ouverture des fenêtres pendant les cours en hiver a eu les réponses suivantes :

— 30 % des professeurs ouvrent « très rarement »,

— 50 % des professeurs ouvrent « parfois »,

— 20 % des professeurs ouvrent « souvent ».

Il est probable qu'en France, où les hivers sont plus doux, l'ouverture des fenêtres est encore plus fréquente.

Toutes ces études mentionnent que, malgré un très faible poids de vapeur dans l'air extérieur en période froide, l'humidité relative intérieure est toujours restée comprise entre 25 et 70 % et n'a pas posé de problèmes, même dans les écoles où une ventilation correcte était assurée. Ces chiffres s'expliquent par l'importance du dégagement de vapeur d'eau par les élèves.

2. Estimation des besoins en air frais

Les besoins en ventilation sont conditionnés par le problème des odeurs, qui dans des salles de classe sont uniquement dues aux produits des échanges du corps humain. On admet souvent qu'une évaluation indirecte d'une telle pollution est assez bien représentée par la teneur en gaz carbonique lorsque le dégagement de ce gaz est dû uniquement à la présence des personnes, ce qui est le cas dans les classes. Pour maintenir un niveau de pollution acceptable, Andersen et Lundqvist (étude n° 6) admettent que la teneur en gaz carbonique ne doit pas excéder 0,10 %. D'autres auteurs indiquent qu'à 0,15 % la pollution est déjà appréciable.

Avec ces hypothèses, on peut calculer le débit d'air neuf nécessaire par élève.

En admettant que l'air extérieur contient 0,03 % de gaz carbonique, ce qui correspond à un site dégagé, que chaque élève dégage à peu près 20 litres/h, on obtient les valeurs suivantes :

— pour 0,10 % : 28 m³/h par élève ;

— pour 0,15 % : 17 m³/h par élève.

Yaglou (étude n° 10) indique que selon une étude effectuée par la « Massachusetts State Health Commission », une amenée d'air extérieure de 17 à 25 m³/h par élève s'est avérée suffisante pour maintenir les odeurs à un niveau acceptable pour des personnes passant du couloir dans les salles de classe.

Examinons ce qui se passe dans le cas d'une classe de 180 m³ contenant 35 élèves dans laquelle les cours durent 50 minutes, fenêtres fermées, et sont suivis d'une récréation de 10 minutes pendant laquelle on ouvre les fenêtres en grand :

1. Fenêtres fermées, d'après les résultats cités plus haut (étude n° 1), on peut estimer que le renouvellement d'air est de l'ordre de 0,75 volume par heure soit à peu près 3,8 m³/h par élève. Après 50 minutes, la teneur en gaz carbonique atteint donc 0,28 % (si on n'ouvrait jamais les fenêtres elle atteindrait 0,56 %).

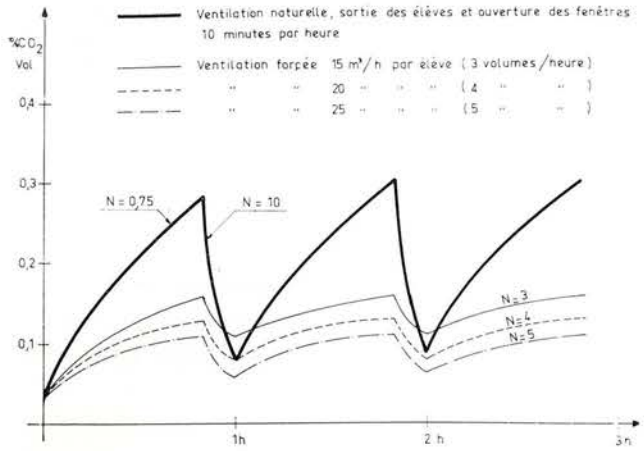


Figure 3

Teneur en gaz carbonique des salles de classe.

2. Fenêtres ouvertes, on peut estimer d'après nos propres mesures que le renouvellement d'air est de l'ordre de 10 volumes par heure. Les élèves étant absents, après 10 minutes, la teneur tombe à 0,08 %.

3. Les élèves rentrent et les fenêtres sont fermées ; 50 minutes plus tard la teneur atteint 0,30 %.

4. Sortie des élèves, ouverture des fenêtres pendant 10 minutes ; la teneur tombe à 0,09 %.

Les courbes de la figure 3 montrent comment évolue la teneur en gaz carbonique : le régime devient rapidement périodique.

On a tracé en pointillé, sur le même graphique, le résultat obtenu en ventilation mécanique avec un débit constant égal à 15, 20 ou 25 m³/h par élève, ce qui correspond à un renouvellement d'air égal à 3, 4 ou 5 volumes par heure. On voit que 15 m³/h est un strict minimum, le chiffre convenable devant se situer entre 20 et 25 m³/h.

On a relevé les chiffres suivants dans certains règlements étrangers :

— Suède : 15 m³/h par élève ;
— Norvège : 15 m³/h par élève avec réduction progressive lorsque la température extérieure est inférieure à moins 5° ;
— États-Unis : variable selon les États entre 17 à 25 m³/h par élève.

Un débit de 15 à 20 m³/h peut être obtenu par ouverture des fenêtres pendant les cours comme le font certains professeurs, mais on ne peut alors éviter de créer un inconfort dans une assez grande partie de la classe.

Des solutions pourraient peut-être être trouvées en ventilation naturelle dans des bâtiments « à une classe d'épaisseur », mais ces bâtiments ne sont pas économiques. Le recours à la ventilation mécanique semble donc « la » solution au problème de la pureté de l'air.

3. Influence sur l'hygiène et le développement des maladies

Yaglou (étude n° 10) cite des recherches faites pour voir si la ventilation des locaux à forte densité d'occupation réduit le développement des épidémies. Ces recherches n'ont pas permis de montrer vraiment s'il existe une relation entre la ventilation et le développement des maladies infectieuses.

Il ne semble pas que des études plus récentes aient permis de mettre en évidence de manière certaine une influence favorable de la ventilation dans ce domaine.

III. Le chauffage

Un renouvellement d'air de l'ordre de 4 volumes/heure nécessaire, comme nous venons de le voir, pour assurer une pureté de l'air satisfaisante, entraîne-t-il un supplément de dépenses de chauffage important ?

Ce supplément de dépenses ne peut-il être compensé par l'association du chauffage et de la ventilation permettant une grande souplesse de fonctionnement donc une limitation maximale de la durée de fonctionnement du chauffage ?

L'Institut national suédois de recherche du bâtiment a effectué une recherche sur ce sujet (étude n° 3) en enregistrant les consommations de chaleur de 40 écoles comportant les différents systèmes de chauffage et de ventilation suivants :

— chauffage par radiateur et régulation centrale sur la température extérieure avec :
  — ventilation naturelle ;
  — extraction mécanique de l'air ;
  — amenée et extraction mécaniques de l'air ;
— chauffage par air chaud (donc amenée mécanique de l'air) ;
  — réglé centralement sur la température extérieure ;
  — réglé dans chaque classe par thermostat intérieur.

Les principales conclusions de cette étude sont :

1. Des économies importantes peuvent être faites si l'on tire parti des apports internes et des apports solaires, ce qui n'est pas le cas des régulations centrales ne tenant compte que de la température extérieure ;

2. En ce qui concerne la ventilation mécanique, la durée de fonctionnement est le facteur déterminant. Il importe que l'installation ne fonctionne que pendant les heures de classe ;

3. Si l'on coupe l'installation de chauffage pendant les heures de non utilisation (nuit et week-end) l'économie peut être de 10 % si le bâtiment est léger et de 3 % si le bâtiment est lourd ;

4. La consommation de chauffage dans les écoles équipées d'un système à air extérieur chauffé, contrôlé par thermostat d'ambiance, est du même ordre de grandeur que dans les écoles traditionnelles (chauffage par radiateur et régulation centrale sur la température extérieure, ventilation naturelle).

Il semble donc qu'une ventilation mécanique fonctionnant pendant les heures de classe peut ne pas entraîner de dépenses de chauffage supplémentaires.

En dehors de ces résultats d'observation, nous n'avons pas trouvé de recherches vraiment exhaustives dans ce domaine. Il semble que des observations plus poussées et des calculs, notamment

par analogie électrique, devraient permettre de chiffrer avec précision l'incidence de tous les facteurs du problème.

IV. La hauteur sous plafond

Les calculs de teneur en CO^2 donnés plus haut au paragraphe II. 2 concernent des salles de classe de 3 m de hauteur sous plafond, occupées normalement, soit 35 élèves pour une classe de 60 m^2 et 180 m^3.

En ventilation naturelle, la teneur en CO^2 atteinte au bout de 50 minutes est égale à 0,28 %; elle serait supérieure si on diminuait le volume par élève en abaissant la hauteur sous plafond tout en conservant le même débit d'air, ce qui serait le cas si la hauteur du plafond était abaissée sans modification des dimensions des ouvrants. Par exemple avec une hauteur sous plafond de 2,50 m, la teneur en CO^2 au bout de 50 minutes serait égale à 0,31 %.

Par contre, en ventilation mécanique, le volume de la classe n'influe pas sur la teneur en CO^2 atteinte à l'équilibre; il influe seulement sur le temps mis à atteindre cet équilibre.

La hauteur des salles de classe en France est actuellement fixée à 3 m. Dès lors que celle-ci ne joue plus sur la pureté de l'air, jusqu'où peut-on aller compte tenu des autres facteurs (éclairage, perception de l'espace, etc.) ?

L'idée d'abaisser la hauteur sous plafond n'est pas nouvelle. Elle est mentionnée par Yaglou (étude n° 10) et Dupuy (étude n° 16). Une recherche sur le sujet a été entreprise en Afrique du Sud (étude n° 8).

Les facteurs pris en considération sont les suivants :

— hauteur au-dessus des têtes d'occupants debout;
— proportion des salles sous l'angle du confort psychologique,;
— éclairage naturel et artificiel;
— acoustique;
— ventilation et confort thermique.

Une première conclusion de l'étude est que la hauteur des salles de classe normales semble pouvoir être abaissée sans inconvénient à 9 pieds (2,74 m).

Une recherche est en cours sur ce problème au CSTB.