

NOUVEAUX DOCUMENTS

RELATIFS

AU CHAUFFAGE ET A LA VENTILATION

DES ÉTABLISSEMENTS PUBLICS

Imprimerie de Ch. Lahure (ancienne maison Crapelet
rue de Vaugirard, 9, près de l'Odéon.

NOUVEAUX DOCUMENTS

RELATIFS

AU CHAUFFAGE ET A LA VENTILATION

DES ÉTABLISSEMENTS PUBLICS

SUIVIS

DE NOUVELLES RECHERCHES SUR LE REFROIDISSEMENT ET LA TRANSMISSION DE LA CHALEUR

pour servir de Supplément à la seconde édition du *Traité de la chaleur*

PAR E. PÉCLET

ancien inspecteur général de l'instruction publique, professeur de physique appliquée aux arts à l'École centrale des Arts et Manufactures, membre du Conseil de la Société d'encouragement, etc.



PARIS

LIBRAIRIE DE L. HACHETTE ET C^{ie}

RUE PIERRE-SARRAZIN, N^o 14

(Près de l'École de Médecine)

—

PRÉFACE.

Depuis l'impression de la seconde édition du *Traité de la chaleur*, plusieurs édifices publics ont été chauffés et ventilés par divers systèmes; pour quelques-uns d'entre eux, notamment pour la prison Mazas et pour l'église Saint-Roch, des expériences nombreuses et longtemps prolongées, ont été faites pour constater les effets produits par les appareils. J'ai pensé que la publication des documents relatifs à ces expériences serait une chose importante, parce que tous renferment des résultats utiles, et que quelques-uns font connaître avec les plus grands détails les phénomènes qui se produisent dans le chauffage des grands édifices.

Je joindrai à ces documents les résultats de nouvelles recherches sur le refroidissement et sur la transmission de la chaleur à travers les corps mauvais conducteurs, recherches qui m'ont occupé plusieurs années.

Le chapitre I^{er} renferme des documents relatifs au chauffage et à la ventilation de quelques édifices publics, et des observations sur l'état actuel de cette importante question. Dans le chapitre II, j'ai réuni les formules usuelles au moyen desquelles on peut calculer les quantités de chaleur perdues par les corps exposés à l'air, et celles qui traversent les corps mauvais conducteurs. Enfin le chapitre III renferme les détails des expériences sur le refroidissement et la transmission de la chaleur, qui ont servi à l'établissement des formules contenues dans le chapitre II.

NOUVEAUX DOCUMENTS

RELATIFS

AU CHAUFFAGE ET A LA VENTILATION

DES ÉTABLISSEMENTS PUBLICS

RECUEILLIS DE 1843 A 1853.

CHAPITRE PREMIER.

RAPPORTS ET MÉMOIRES RELATIFS AU CHAUFFAGE ET A LA VENTILATION
DE QUELQUES ÉDIFICES PUBLICS.

§ 1. PRISON MAZAS.

En 1843, une commission fut nommée par M. le préfet de la Seine pour examiner des projets de chauffage et de ventilation de cette prison, présentés par M. Grouvelle et par M. Duvoir-Leblanc. Cette commission était composée de M. Arago, président, de MM. Gay-Lussac, Pouillet, Dumas, Boussingault, Andral, membres de l'Académie des Sciences; Pecllet, Leblanc; Bouvattier, Grillon, Marcellot, membres du conseil général de la Seine; Durand et Jay, membres de la commission d'architecture de la ville de Paris; Lecoing et Gilbert, architectes de la nouvelle prison; Mastrelle, chef de division; et Darié, chef du bureau des travaux de la ville de Paris.

Une sous-commission, composée de MM. Dumas, Boussingault, Andral, Pecllet et Leblanc, fut chargée d'étudier les modes de ventilation et de vidange qu'il serait le plus convenable d'employer, et de déterminer par l'expérience le volume d'air qui devait être fourni par heure à chaque détenu. Une autre sous-commission, composée de MM. Boussingault, Pecllet et Leblanc, avait pour mission d'examiner les projets de chauffage et de ventilation présentés par les deux concurrents.

Je ne donnerai pas, avec tous leurs détails, les rapports de ces deux sous-commissions, ni les discussions qui ont eu lieu dans les réunions générales : ces développements seraient

trop étendus et pour la plupart de trop peu d'intérêt; je me bornerai aux faits principaux, à ceux qui sont d'un intérêt général. D'ailleurs, ces rapports et les discussions auxquelles ils ont donné lieu, ont fait l'objet d'une brochure, publiée en 1845, par M. Grouvelle, et à laquelle nous renvoyons le lecteur qui voudrait connaître toutes les particularités de cette affaire.

A l'époque de la nomination de la commission, les constructions de la prison Mazas n'étaient point terminées. D'après les plans en voie d'exécution, ils devaient consister en six bâtiments rayonnant autour d'un centre commun, comprenant ensemble à peu près les deux tiers de la circonférence, et enveloppés par un mur d'enceinte; chaque bâtiment devait être divisé en deux parties, par un grand corridor ayant la même longueur et s'élevant jusqu'au toit; chaque aile devait renfermer trois étages de cellules y compris celles du rez-de-chaussée; celles du premier et du second étage étaient desservies par un balcon. Le bâtiment destiné à l'administration devait être placé dans l'angle formé par le premier et le sixième bâtiment de la prison. Cette description succincte est suffisante pour faire comprendre les principes des projets présentés par les concurrents.

Dans le projet de M. Duvoir-Leblanc, les appareils de chauffage consistaient en six chaudières à eau chaude placées au-dessous de la rotonde centrale, chacune était destinée à un des six bâtiments contenant les cellules. Chaque corridor renfermait huit poêles à eau chaude placés au-dessous du sol, communiquant avec la chaudière par deux tuyaux, servant l'un à amener l'eau échauffée, l'autre à faire retourner l'eau refroidie à la chaudière. L'air extérieur s'échauffait par son passage autour des poêles et se dégageait dans le corridor par une bouche correspondant à chacun. L'air des corridors ainsi échauffé, chauffait les cellules par une circulation qui s'établissait dans chacune d'elles au moyen de deux ouvertures pratiquées l'une à la partie supérieure, l'autre à la partie inférieure. Les cellules du rez-de-chaussée étaient chauffées par des bouches de chaleur partant du canal d'air qui environnait les poêles. La rotonde était chauffée par un poêle à eau chaude, qui en occupait le centre et par la fumée des chaudières, qui avant de se rendre dans la cheminée, parcourait un canal creusé dans le sol et recouvert de plaques de fonte. La ventilation de chaque cellule devait avoir lieu par un canal pratiqué dans un des murs latéraux de la cellule, communiquant par la partie inférieure avec une petite caisse renfermant le vase de nuit, et sous les combles, avec un tuyau de tôle horizontal aboutissant à une cheminée renfermant un poêle à eau chaude; ces cheminées d'appel étaient au nombre de douze. La ventilation des cellules du rez-de-chaussée devait avoir lieu par des tuyaux pratiqués dans le sol et communiquant avec les cendriers des fourneaux.

Le projet de M. Grouvelle reposait, comme celui de M. Duvoir-Leblanc, sur le principe de la circulation de l'eau chaude, mais M. Grouvelle avait recours à la vapeur comme moyen de transmission de la chaleur aux appareils à eau chaude destinés au chauffage des bâtiments. La vapeur était produite par trois générateurs placés dans les caves de la rotonde centrale. A l'extrémité de chaque étage des bâtiments cellulaires, se trouvait un cylindre de tôle vertical plein d'eau, chauffé par la vapeur circulant dans un serpentin; un tuyau de fonte partant de la partie supérieure du cylindre, circulait dans

un canal formé sous le plancher du balcon des étages et sous le sol pour le rez-de-chaussée et venait rejoindre le cylindre, mais à la partie inférieure. Le canal était interrompu par des cloisons transversales, suivant les prolongements des murs de séparation des cellules; chacun de ces compartiments communiquait avec l'extérieur par un petit canal pratiqué dans le sol de la cellule, et avec la cellule par un autre canal qui s'ouvrait à une petite distance du sol; enfin l'air de chaque cellule s'échappait, après avoir traversé la caisse renfermant le vase de nuit, par un canal vertical qui débouchait sous les combles dans un canal commun, qui descendait à l'extrémité du bâtiment et débouchait dans le cendrier d'un foyer communiquant avec une puissante cheminée. Les bâtiments de l'administration devaient être chauffés par des poêles à eau chaude maintenus chauds par une circulation de vapeur.

La commission générale, sur la proposition de la sous-commission chargée de l'examen des projets, a rejeté le projet de M. Duvoir-Leblanc, par beaucoup de considérations; nous rapporterons les principales : 1° pour le chauffage des cellules par la circulation de l'air, il faudrait connaître d'avance les dimensions des orifices de communication, car ils doivent être pratiqués dans des murs épais, et il est absolument impossible de les calculer d'avance; 2° en supposant cette difficulté vaincue, le chauffage des étages supérieurs serait plus grand que celui des étages inférieurs; 3° le chauffage des cellules par l'air du corridor ne donnerait jamais aux détenus que de l'air déjà vicié, et un détenu pourrait à volonté infecter tout son quartier; 4° la ventilation des rez-de-chaussée par les foyers des fourneaux ne permettrait pas d'y établir une ventilation régulière, car elle varierait nécessairement avec l'activité du foyer; 5° les douze cheminées d'appel partant des combles, et chauffées par des poêles à eau chaude, seraient peu efficaces, parce qu'elles n'auraient qu'une faible hauteur, et qu'on ne pourrait ni régler ni contrôler journellement la ventilation, attendu que les anémomètres ne pourraient être placés qu'aux orifices des cheminées qui ne seraient accessibles qu'avec des échafaudages.

Le projet de M. Grouvelle a été admis par la commission, mais avec quelques modifications, que nous indiquerons, après avoir rendu compte du travail de la sous-commission chargée d'étudier les questions relatives à l'assainissement des cellules.

Les expériences ont été faites dans une cellule de la Conciergerie; l'un des membres de la sous-commission, M. Leblanc, y avait été renfermé avec les appareils nécessaires pour constater la composition de l'air et son état hygrométrique. Les jointures de la porte et de la fenêtre avaient été soigneusement calfeutrées. L'air était chauffé extérieurement dans un petit calorifère et versé dans la cellule par un orifice percé à peu près à un mètre de hauteur; l'air était appelé par un tuyau extérieur dans lequel brûlaient plusieurs bougies; la partie inférieure de ce tuyau était garnie d'un registre au moyen duquel on réglait la ventilation; le tuyau d'appel communiquait avec la partie inférieure d'une chaise percée dont le couvercle était garni d'un grand nombre d'ouvertures. La vitesse d'écoulement de l'air était mesurée par un anémomètre de M. Combes. Les expériences ont duré jusqu'à dix heures consécutives. Voici les résultats de ces expériences.

* *Expulsion de l'odeur.* Les expériences répétées ont démontré qu'avec les dispositions adoptées, 6 mètres cubes d'air par heure étaient insuffisants pour maintenir

l'atmosphère de la cellule exempte d'odeur désagréable. A cette dose de ventilation, l'acétate de plomb en dissolution, placé près du siège, manifestait bientôt la présence de l'acide sulfhydrique ou du sulfhydrate d'ammoniaque.

« Avec un renouvellement d'air de 10 mètres cubes par heure, la vitesse du courant a été suffisante pour s'opposer à la diffusion des odeurs dans l'enceinte, d'après le jugement des personnes douées d'organes délicats. L'air qui s'écoulait dans le tuyau d'appel était infect. Lorsque, sans interrompre la ventilation, on ouvrait le couvercle du coffre, une odeur prononcée ne tardait pas à se répandre dans la cellule, et il fallait environ vingt minutes de ventilation au même degré, après avoir fermé le couvercle, pour que l'odorat ne fût plus affecté d'une manière sensible. Nous avons reconnu qu'il était indispensable que le vase destiné à recevoir les déjections solides contînt deux à trois litres d'eau; les matières excrémentielles, en tombant dans le vase sec, répandent des exhalaisons si fortes, qu'une ventilation même plus active est insuffisante pour empêcher la transmission de l'odeur.

« *État chimique de l'air.* Avant la reclusion de l'observateur, la cellule avait été maintenue assez longtemps en communication avec l'air extérieur, pour que l'on pût considérer la pureté de l'air au commencement de l'expérience comme égale à celle de l'air normal.

« La reclusion a duré dix heures. Il faut noter comme source de production d'acide carbonique, la combustion d'une bougie pendant deux heures et demie après la fermeture de la porte.

« La ventilation, inférieure à 10 mètres cubes par heure pendant les deux premières heures du séjour, a été portée à 10 mètres cubes pendant le reste de la journée. L'appareil de chauffage a pu amener la température de la cellule de 3°,5 à 11°,5, et maintenir cette température pendant la plus grande partie de la journée; l'observateur n'a éprouvé ni gêne ni malaise: la sensation d'un léger dégoût, éprouvée pendant les deux premières heures du séjour, sous l'influence d'une ventilation insuffisante, s'était complètement effacée.

« Le dosage de l'acide carbonique dans l'air recueilli, exécuté par la méthode décrite par l'un de nous, a décelé, dans cet air, la présence de 33 dix-millièmes d'acide carbonique en poids; cette proportion est plus que quadruple de celle qui existe dans l'air normal, d'après M. Boussingault.

« D'après la capacité de la cellule, il y avait donc dans l'enceinte, au moment de la prise d'air, 57 grammes d'acide carbonique, dont une partie devait avoir pour origine la combustion de la bougie; le reste provenait de la respiration.

« Ce résultat peut déjà faire juger de l'effet de la ventilation, qui aurait pu être plus complète. Pour mieux juger des effets produits, il faut comparer ce nombre à la quantité d'acide carbonique produit pendant le séjour. Or, les résultats d'une détermination de MM. Andral et Gavarret, sur la respiration de l'observateur, indiquent 31^{gr},46 d'acide carbonique produit par heure; pendant dix heures, la quantité devait donc être de 314 grammes. Il faut ajouter l'acide carbonique produit par la bougie pendant deux heures et demie, 20 grammes; en tout 334 grammes: sur cette quantité, 277 grammes

seulement auraient été expulsés par la ventilation, pendant les dix heures qu'a duré l'expérience.

« L'analyse de l'air d'une pièce sensiblement de même capacité que la cellule, fermée et non ventilée, et occupée pendant dix heures par le même observateur, a fourni 1 pour 100 d'acide carbonique.

« *État hygrométrique.* Au commencement de l'expérience, l'air extérieur était à 2 degrés; les observations du psychromètre ont donné 0,75 pour l'état hygrométrique : chaque mètre cube d'air contenait donc 4^{sr}, 2 de vapeur aqueuse.

« Dans la cellule, l'état hygrométrique initial était 0,80 à la température de 3°, 5; chaque mètre cube contenait donc 5^{sr}, 2 de vapeur d'eau : au bout de quelques heures de faible ventilation, l'état hygrométrique était de 0,73 pour la température de 10 degrés. La quantité de vapeur aqueuse, par mètre cube, était donc de 7^{sr}, 3. A la fin du jour, l'état hygrométrique était de 0,76 pour la température de 11°, 5, et la quantité de vapeur d'eau par mètre cube était de 7^{sr}, 9.

« Ces résultats prouvent que l'état hygrométrique a peu varié dans l'intérieur de la cellule, sous l'influence de la ventilation, à raison de 10 mètres cubes par heure.

« En examinant de près ces résultats, et en remarquant que la température moyenne à l'extérieur est restée basse, on reconnaît facilement l'influence que la transpiration a exercée sur l'état hygrométrique de l'air. En effet, cet état aurait dû baisser; la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air de la cellule, à la fin du séjour, aurait dû être presque moitié moindre de celle qui a été trouvée, en supposant la cellule vide et amenée, par la ventilation, à contenir de l'air au même état, à la température près, que l'air extérieur. C'est ce qui arriverait nécessairement dans les conditions que nous venons de supposer, et de plus dans l'hypothèse où l'enceinte aurait un pouvoir hygroscopique nul.

« Dans la cellule en expérience, dont les murs étaient peints à l'huile, les actions hygroscopiques paraissent avoir eu peu d'influence pour abaisser l'état hygrométrique du milieu, et compenser les effets de la transpiration.

« Il n'en est plus de même lorsque les parois sont boisées, lambrissées ou tendues de papier. L'un de nous ayant séjourné dans un cabinet fermé, de 13^m, 5 de capacité, dont les parois étaient formées de châssis tendus de papier, n'a pu constater aucune variation dans l'état hygrométrique de l'air, pendant dix heures de séjour continu. La température était de 21°, 5 au commencement, et de 21°, 8 à la fin du séjour; l'état hygrométrique initial était de 0,75 et n'a pas varié de 0,01. »

Les conclusions du rapport sont : 1° que la ventilation doit être considérée comme le principal moyen d'assainissement; 2° que le chiffre doit en être porté à 10 mètres cubes au moins, par prisonnier et par heure; 3° que la température des cellules doit être maintenue à 15 degrés.

A la suite du rapport d'une autre sous-commission, qui avait été chargée d'examiner les différents systèmes de fosses d'aisance et de vidange, la commission générale a admis, comme la disposition la plus convenable dans le cas dont il s'agit, un siège fixe pour chaque cellule, avec un tuyau de descente servant à la ventilation.

Les modifications que la commission a cru devoir faire au projet de M. Grouvelle,

consistaient : 1° à porter à 10 mètres cubes par heure le volume d'air à fournir à chaque cellule; 2° à élever à 15 degrés la température constante des cellules; 3° à établir une double circulation d'eau chaude, et en sens contraire, dans le canal placé sous les balcons, afin qu'en chaque point du circuit la température moyenne des tuyaux fût sensiblement constante; 4° à établir la ventilation des cellules par les tuyaux de descente des matières fécales.

Le projet de M. Grouvelle, modifié par la commission, fut adopté par le conseil général du département de la Seine, le 16 novembre 1844, puis par M. le préfet, puis par le conseil des bâtiments civils, et enfin par M. le ministre de l'intérieur, le 14 mai 1845.

Les travaux ont été exécutés suivant les indications de la commission. Dans le courant de 1849, M. le préfet du département de la Seine nomma une commission spéciale à l'effet d'*examiner et de recevoir, s'il y avait lieu, les travaux et appareils de chauffage et de ventilation exécutés à la prison cellulaire Mazas, par M. Grouvelle.* Cette commission était composée ainsi qu'il suit : M. Pelet, inspecteur général de l'instruction publique; MM. Lecoq et Gilbert, architectes de la nouvelle prison; M. Bruzard, architecte de la préfecture de police; M. Jay, professeur à l'École d'architecture; M. Besuchet, inspecteur général des prisons; M. Leblanc, répétiteur à l'École polytechnique, et M. Chauvin, ingénieur civil. Voici le rapport de cette commission :

« Monsieur le préfet,

« Par une décision en date du 23 août 1849, vous avez nommé une commission spéciale chargée de vous faire un rapport sur les appareils de chauffage et de ventilation établis par M. Grouvelle à la prison Mazas, destinée à remplacer l'ancienne prison de la Force.

« La commission s'est immédiatement réunie, et, pénétrée de l'importance d'un examen approfondi d'un système aussi vaste de chauffage et de ventilation, la commission a pensé qu'elle ne pouvait pas se borner à porter un jugement, sur l'inspection des appareils et sur quelques expériences rapides, mais que pour asseoir son opinion d'une manière certaine, il était nécessaire de soumettre les appareils à des expériences suivies et prolongées pendant une année au moins.

« La commission a déjà eu l'honneur de vous adresser un premier rapport provisoire dans le mois d'avril 1850. Ce rapport constatait, monsieur le préfet, que la commission n'avait pu commencer son travail avant le 14 février 1850, attendu qu'à cette époque seulement une partie des appareils a pu fonctionner d'une manière régulière. Dans sa lettre, la commission citait les expériences faites dans une partie des bâtiments, sous le rapport du chauffage et de la ventilation, et elle indiquait plusieurs modifications dont l'exécution a entraîné quelques retards.

« Nous venons aujourd'hui, monsieur le préfet, vous faire connaître l'opinion définitive de la commission, opinion qui repose sur l'expérience de plus d'une année, soit avant, soit depuis l'occupation de la prison par les prévenus.

« Rappelons d'abord les conditions imposées au constructeur, par la commission

nommée en 1843 par M. le préfet de la Seine. Cette commission concluait à l'adoption du projet de M. Grouvelle, et à la suite d'expériences faites par une sous-commission, elle avait proposé : 1° que la ventilation ne fût pas inférieure à 10 mètres cubes par prisonnier et par heure ; 2° que la température fût maintenue constamment à 15 degrés. Ces conclusions adoptées par l'administration, sur le rapport du conseil général, ont été rendues obligatoires pour le constructeur.

« *Disposition des bâtiments.* La prison cellulaire des prévenus est composée de six corps de bâtiments qui rayonnent autour d'un centre commun. Au milieu de chacun de ces bâtiments se trouve un grand corridor qui s'élève jusqu'à la toiture ; il est fermé à son extrémité par un vitrage qui règne sur toute la hauteur. De chaque côté, au rez-de-chaussée et aux deux étages supérieurs, se trouvent une série de cellules, contiguës, d'une capacité de 20 mètres cubes ; leur nombre total est de 1200.

« *Principe du chauffage.* Le principe sur lequel repose le système de chauffage de M. Grouvelle est le chauffage de l'air par son contact avec des tuyaux à circulation d'eau chaude. Ce qui particularise ce système, c'est la transmission de la chaleur à l'aide de la vapeur partant de générateurs placés dans les caves et se rendant dans des réservoirs d'eau placés à différents étages et servant à la circulation.

« Dans ce système, la circulation d'eau chaude n'a lieu que sous une pression très-faible, et les divers étages d'un même bâtiment ne sont pas solidaires sous le rapport du chauffage, qui peut être interrompu pour un étage non occupé.

« *Ventilation.* La ventilation est produite par l'appel d'une vaste cheminée de quatre mètres carrés de section et de vingt-neuf mètres de hauteur, placée au centre des bâtiments.

« L'air appelé dans l'intérieur des cellules et destiné à la ventilation est chauffé en hiver au contact des tuyaux à eau chaude. La totalité de l'air expulsé des cellules par la ventilation descend par les tuyaux qui servent à l'écoulement des déjections des prisonniers. Chaque cellule renferme un siège terminé par un tuyau de descente qui se dirige vers la cave. La ventilation a pour but de maintenir pure l'atmosphère des cellules, en leur fournissant une quantité d'air extérieur suffisante pour remplacer celle qui est viciée par la respiration et les émanations du prisonnier ; elle doit être assez grande pour s'opposer aux émanations du tuyau de descente.

« *Disposition des appareils dans les bâtiments.* Dans chaque bâtiment et le long du corridor, se trouvent, au premier et au deuxième étage, des balcons sur lesquels s'ouvrent les cellules. Au-dessous de ces balcons, placés à droite et à gauche se trouvent des caniveaux dans lesquels des tuyaux en fonte forment deux circuits parallèles que l'eau chaude parcourt en sens contraires, afin que sur chaque point la température soit à peu près constante. Pour le rez-de-chaussée, ces tuyaux sont placés dans un canal situé au-dessous du sol du corridor et toujours au pied des cellules. Les caniveaux sont séparés, dans la direction des murs des cellules, par des cloisons transversales. Chacun de ces intervalles communiquait primitivement avec l'atmosphère par un canal creusé dans le sol de la cellule ; depuis, comme nous le dirons plus loin, cette disposition a été remplacée par des communications avec l'air du corridor. Ces mêmes espaces communiquent avec les cellules par un canal qui se termine par plusieurs grilles.

« Chaque circuit de tuyaux à eau chaude communique avec un réservoir dans lequel l'eau est chauffée par la condensation de la vapeur qui circule dans un serpentin. Six chaudières peuvent fournir la vapeur à tous les réservoirs au moyen d'une conduite générale.

« Dans chaque cellule se trouve un siège d'aisance composé d'une cuvette en fonte et d'un tuyau de descente aboutissant à un tonneau de vidange. Tous les tonneaux d'un même bâtiment sont rangés dans une galerie souterraine ayant toute la longueur du corridor sur lequel s'ouvrent les cellules.

« Les six galeries souterraines aboutissent, par leurs extrémités les plus rapprochées, à un canal commun, annulaire, en communication avec la cheminée d'appel. Les autres extrémités des galeries communiquent avec l'extérieur, mais elles sont fermées par de doubles portes parfaitement closes et peuvent livrer passage à un chariot roulant sur un chemin de fer destiné au transport des tonneaux.

« Il résulte des dispositions que nous venons d'indiquer, que l'eau des réservoirs étant chauffée par la vapeur circulant dans les serpentins, il s'établit, en vertu de l'inégalité de température, une circulation entre les réservoirs et les tuyaux qui partent de ces réservoirs et longent les cellules. La circulation s'établit d'une manière continue, car l'eau des tuyaux se refroidit constamment et revient s'échauffer dans les réservoirs. Le foyer de la cheminée d'appel, placé dans les caves, étant constamment allumé, il en résulte un appel de l'air des cellules à travers les tuyaux de descente. Cet air traverse les galeries souterraines et gagne le foyer d'appel. Les portes de ces galeries fermant bien, il ne peut y avoir appel direct de l'air extérieur. A mesure que l'air sort des cellules, il est remplacé par de l'air venant des corridors et échauffé par son contact avec les tuyaux de circulation d'eau chaude.

« *Dispositions employées pour régler la ventilation des cellules.* Pour régler la ventilation des cellules, on a garni le tuyau de descente, dont l'extrémité inférieure plonge dans un tonneau fermé, d'un embranchement latéral dont l'extrémité est fermée par un tampon garni d'un orifice dont la section peut être réduite à volonté au moyen d'une plaque tournante.

« *Systèmes des expériences employées pour vérifier le chauffage et la ventilation.* Pour mesurer la température des cellules, on s'est servi d'une centaine de thermomètres, préalablement comparés entre eux, et assez sensibles pour donner des indications exactes à un quart de degré centigrade au moins. Chacun de ces thermomètres a été placé à 1^m,50 de hauteur, à partir du sol de la cellule, et dans une position semblable dans chaque cellule. On a opéré successivement sur tous les points des bâtiments, en faisant chaque fois un grand nombre d'observations simultanées.

« La ventilation a été mesurée au moyen d'anémomètres de M. Combes, construits par M. Newmann. Pour mesurer les courants d'air dans le canal de ceinture qui aboutit à la cheminée d'appel, on s'est servi d'un anémomètre ordinaire, sensible à une vitesse de 0^m,12 par seconde. Mais pour la ventilation des cellules mêmes, on a eu recours à un instrument plus sensible, construit exprès pour cet objet, et gradué lorsqu'il était placé dans le tuyau même où il devait fonctionner; ce tuyau était un cylindre de 0^m,12 de diamètre, terminé inférieurement par un cône, dont la base munie d'un rebord et d'une

bande de drap s'appliquait exactement sur les bords de l'ouverture du siège. Cet anémomètre était sensible à une vitesse de 0^m,08 par seconde. Pour mesurer la ventilation d'un corps de bâtiment tout entier, l'anémomètre ordinaire était placé successivement sur plusieurs points de la section du canal de communication des caveaux avec le foyer, afin d'obtenir la vitesse moyenne du courant.

« Les expériences sur le chauffage et la ventilation ont été faites par une sous-commission composée de MM. Pecllet, Leblanc et Thauvin, ingénieur civil, adjoint à la commission par décision administrative et sur la proposition des membres de la commission générale, mais les expériences ont été répétées et suivies plus spécialement par M. Thauvin. Ces expériences ont duré avec la régularité nécessaire depuis le 14 février 1850 jusqu'à ce jour (30 avril 1851). Il y a eu continuité dans les observations toutes les fois qu'il a été nécessaire de constater un fait important. Toutes ces expériences sont consignées, par ordre de dates, sur un registre que la commission tient à la disposition de l'administration. Ce registre a servi à relever un certain nombre de tableaux, qui résument les expériences les plus significatives pour le chauffage et la ventilation, et que nous joignons à ce rapport comme pièces justificatives.

« Ainsi que nous avons déjà eu l'honneur de vous l'écrire, M. le préfet, les résultats ont été aussi réguliers qu'on pouvait le désirer pour le chauffage des différents étages. Nous avons reconnu également que la cheminée de ventilation avait une puissance bien supérieure à celle qui était exigée, attendu qu'elle s'est élevée à 30 000 mètres cubes par heure, ce qui correspond à un renouvellement moyen d'air de 25 mètres cubes par cellule et par heure, au lieu de 10 mètres cubes, limite inférieure imposée par le cahier des charges. Nous avons reconnu de plus, qu'au moyen de registres placés dans les conduits des souterrains à la cheminée d'appel, on pouvait répartir la ventilation générale, de manière à la rendre sensiblement égale pour les six bâtiments. Les analyses de l'air provenant de deux cellules habitées, appartenant à deux étages d'un même bâtiment et ventilées à raison de 25 mètres cubes par heure, ont démontré que la proportion d'acide carbonique produite par la respiration ne dépassait pas 1 millième. Ces résultats ont été communiqués à la commission d'hygiène.

« Dans la disposition primitive, les prises d'air avaient lieu par des orifices percés sur les faces extérieures des bâtiments, et nous avons reconnu que le chauffage et la ventilation éprouvaient des variations notables par l'influence des vents et du soleil; souvent l'air, échauffé dans les caniveaux renfermant les tuyaux de circulation de l'eau, sortait par les orifices des prises d'air : c'était alors l'air des corridors qui pénétrait par-dessous la porte et produisait la ventilation des cellules. D'après l'avis que nous avons émis dans notre lettre du 15 avril 1850, vous avez autorisé, Monsieur le préfet, le changement proposé par M. Grouvelle, qui consistait à prendre l'air dans les corridors et à alimenter chacun d'eux par une prise d'air spéciale. Depuis cette époque, les expériences ont été répétées dans tous les bâtiments, à mesure que chaque changement était effectué. Toutes ces expériences ont constaté les avantages de cette nouvelle disposition.

« Ainsi, dans l'état actuel des choses, la température a été maintenue, pendant l'hiver, entre 13 et 16 degrés, dans tous les bâtiments occupés, sauf pendant quelques

interruptions accidentelles et momentanées dans le chauffage. Nous ferons remarquer que la température aurait pu être maintenue à un degré plus élevé, ainsi qu'on s'en est assuré, mais ces limites avaient été fixées par la commission d'hygiène nommée par M. le préfet de police. Les résultats de nos expériences se trouvent confirmés par les chiffres consignés dans les rapports fournis par M. le directeur de la prison, qui a fait relever journellement, sur tous les points, la température des cellules.

« Quant à la ventilation, depuis que les appareils de vidange définitifs ont été installés avec les moyens de règlement que nous avons décrits plus haut, elle est devenue suffisamment régulière pour les différentes cellules des six bâtiments, et à tous les étages. Nous avons constaté que cette ventilation demeurerait généralement comprise entre 15 et 25 mètres cubes par cellule et par heure.

« Quoique les expériences aient été faites pendant un hiver peu rigoureux, elles n'en sont pas moins concluantes relativement à la ventilation; car, toutes choses égales d'ailleurs, la puissance d'une cheminée d'appel tend à augmenter lorsque la température de l'air extérieur s'abaisse. En outre, les expériences ont démontré que, dans les circonstances les plus défavorables, il était possible de réaliser encore une ventilation de 30 000 mètres cubes d'air par heure, correspondant en moyenne à 25 mètres cubes d'air par cellule.

« Relativement au chauffage, la considération du peu de rigueur de la température de l'hiver serait de nature à faire ajourner une conclusion positive, relativement à la puissance des appareils de chauffage, si la totalité des chaudières à vapeur avaient fonctionné pendant l'hiver dernier; mais comme sur les six chaudières qui existent dans les caves, quatre seulement ont été chauffées, et seulement pendant douze heures au plus chaque jour, nous regardons comme évidente la possibilité de maintenir la température voulue dans les cellules, pendant les plus grands froids, en chauffant les quatre générateurs d'une manière continue, d'autant plus que la grande quantité de chaleur renfermée dans les murailles tend à maintenir l'uniformité de température. D'ailleurs, pour les cas extrêmes, les chaudières construites comme appareils de rechange, pourraient servir momentanément d'auxiliaires à celles qui fonctionnent d'une manière continue.

« Quant à la construction des appareils, tout ce que nous avons pu voir et examiner nous a paru bien établi; mais il est difficile d'en juger d'une manière certaine après la pose, comme nous avons été appelés à le faire; nous devons ajouter, qu'à l'origine, il s'est manifesté quelques fuites dans les tuyaux à eau chaude, mais elles ont été promptement fermées, et maintenant il n'en existe plus.

« D'après toutes les considérations que nous avons eu l'honneur de vous exposer, Monsieur le préfet, la commission est d'avis de recevoir les appareils de chauffage et de ventilation établis à la prison Mazas par M. Grouvelle. » Suivent les signatures de tous les membres de la commission.

Analyse des tableaux annexés au rapport de la commission de réception des appareils. Ces tableaux, quoique déjà des résumés des registres d'expériences, sont encore trop étendus pour être insérés ici, nous nous contenterons de rapporter les principaux faits qu'ils constatent.

Tableau A et B. Ces tableaux ont pour objet de faire voir quelle a été l'élévation progressive et le maximum de température obtenue dans les cellules par un chauffage continu, pendant l'hiver 1850. Les expériences ont eu lieu dans le bâtiment n° 6, qui était alors seul chauffé. Elles ont duré douze jours consécutifs, du 14 au 25 février 1850. Pendant tout ce temps on a chauffé jour et nuit sans interruption, et la pression de la vapeur a été constamment maintenue entre les limites 2 à 3 atmosphères. Chaque jour on a fait une ou deux fois l'inspection des thermomètres placés au hasard dans 68 cellules du rez-de-chaussée et du premier étage. Toutes les expériences ont été faites dans des cellules inhabitées, car à cette époque la prison n'était pas encore occupée. A cette époque les prises d'air étaient extérieures. Voici les résultats moyens des 960 observations consignés dans ces tableaux; les observations ont été faites dans 17 cellules de chaque étage et de chaque côté, à dix heures du matin et à quatre heures du soir.

REZ-DE-CHAUSSÉE. TEMPÉRATURES MOYENNES DES CELLULES.

Côté gauche, 13,58—15,08—15,83—16,67—18,17—18,27—18,07—18,85—19,25—19,40—19,70—19,50
Côté droit,.. 15,50—17,02—17,93—17,68—19,25—19,06—20,56—20,55—20,73—19,42—20,85—20,72

PREMIER ÉTAGE. TEMPÉRATURES MOYENNES DES CELLULES.

Côté gauche, 14,83—17,00—17,91—18,40—19,46—20,13— » —20,15—20,25—20,18—20,80—20,94
Côté droit,.. 16,88—19,12—19,37—19,23—20,47—20,21—22,05—21,67—21,39—21,72—22,64—23,31

Le même jour à la même heure, les températures d'une même rangée de cellules différaient très-peu les unes des autres.

Il résulte de ces expériences, que par un chauffage continu d'un petit nombre de jours, on a élevé la température des cellules du rez-de-chaussée à 19°,50 et 20°,72, et pour le premier étage à 20°,94 et 23°,31. Les différences qu'on observe entre le rez-de-chaussée et le premier étage proviennent de ce que, pour les premières il y a une perte de chaleur par le sol qui n'existe pas pour les secondes. Les différences entre le côté droit et le côté gauche, proviennent de l'orientation du bâtiment. La température moyenne extérieure pendant la durée des expériences a été de 7°,5.

Tableau C. Ce tableau contient les résultats des expériences faites dans les caves de ventilation qui correspondent à chaque bâtiment, dans le courant de l'hiver 1849-1850. Il résulte de ces expériences que pour une consommation de 13^k,50 de houille, par heure, dans le foyer d'appel, on a expulsé 14800 mètres cubes d'air par heure; que pour une consommation de 22,33 de houille dans le même temps, la ventilation s'est élevée à 24700 et 30900 mètres cubes. Que pendant l'été 1850, à l'époque des plus grandes chaleurs, pour une consommation de 20 kilogrammes de houille à l'heure, la ventilation a varié de 22900 à 25000.

Tableau D. Ce tableau renferme les résultats des expériences de ventilation générale faites dans le courant de l'hiver 1850-1851, dans les mêmes circonstances que l'hiver précédent. Il résulte de ces expériences; 1° que la ventilation s'est élevée à 29200 mètres cubes avec une dépense de 20 kilogrammes de houille à l'heure dans le foyer d'appel;

2° que l'échauffement de la cheminée des générateurs n'a que très-peu d'influence sur la ventilation générale, car après une interruption de chauffage de vingt-quatre heures, la ventilation a été de 28 200 mètres cubes au lieu de 29 200, c'est-à-dire moindre seulement de 1:29 de ce qu'elle était la veille quand les chaudières étaient en activité; 3° qu'en réduisant la consommation du foyer d'appel de 20 kilogrammes à 15 kilogrammes par heure, la ventilation n'a pas sensiblement diminué, puisqu'on la trouve comprise entre 28 100 et 31 500 mètres cubes; 4° que l'activité du foyer d'appel n'a pas une influence immédiate sur la ventilation, et que pour des variations assez grandes dans l'activité de la combustion il ne se produit que de faibles différences dans la ventilation, car en laissant tomber le feu presque complètement, on a eu pour la ventilation à deux heures d'intervalle 25 800 et 24 700 mètres cubes par heure; 5° qu'en éteignant complètement le feu du foyer d'appel, en retirant le charbon et laissant passer l'air froid par la porte et la grille pour refroidir davantage le fourneau, on a encore obtenu 21 500 mètres cubes de ventilation par heure, une demi-heure après l'extinction du feu, et 16 500 mètres cubes une heure et demie après. La faible influence de la cheminée des générateurs, provient de ce que la fumée n'y arrive qu'à une température peu élevée à cause du refroidissement qu'elle éprouve en circulant sous les plaques de fonte de la galerie centrale. L'influence également très-faible d'une variation de consommation de combustible dans le foyer d'appel, et dans l'activité du foyer, provient de ce que le tirage d'une cheminée varie très-peu par des accroissements même très-grands de température de l'air. Enfin le faible décroissement de tirage après l'extinction du foyer, provient de la chaleur renfermée dans la maçonnerie et de l'excès de la température des bâtiments sur la température extérieure.

Tableau E et F. Ces tableaux renferment les résultats des expériences faites sur la température des cellules pendant l'hiver 1850-1851, dans les six bâtiments, pendant le mois de décembre 1850, tous les jours, et à différentes époques dans les mois de janvier, février et mars 1851. Ces tableaux, qui contiennent plus de 1400 indications de température, constatent qu'au même instant les températures des différentes cellules et des corridors ont toujours été comprises entre 13 et 16 degrés. Voici du reste les températures moyennes des six bâtiments pendant le mois de décembre.

	BATIMENT N° 1.	BATIMENT N° 2.	BATIMENT N° 3.	BATIMENT N° 4.	BATIMENT N° 5.	BATIMENT N° 6.
Corridor du rez-de-chaussée..	13,83	13,03	14,48	»	13,01	14,12
Cellules du rez-de-chaussée..	13,74	14,09	13,56	»	14,25	13,11
Cellules du premier étage. . .	13,97	14,28	14,76	»	11,87	14,56
Cellules du deuxième étage. . .	12,19	13,78	14,44	»	14,89	13,98
Corridor du deuxième étage. .	13,18	13,58	14,57	»	14,72	13,59

On n'a point indiqué les températures du quatrième bâtiment, parce qu'il avait été chauffé trop tard et que le régime n'y était pas établi. Pour les six bâtiments, il n'y a que le deuxième étage du premier, dans lequel la température n'a pas été tout à fait suf-

fisante ; mais cela tient à ce qu'à cette époque on ne pouvait chauffer que la circulation du rez-de-chaussée. La température moyenne extérieure du mois de décembre a été de 3°,89. Les températures des corridors et des cellules pendant les mois de janvier, février et mars suivants, ont été comprises entre 13,50 et 16 degrés.

Tableau G et H. Ces tableaux contiennent les consommations de combustibles pour le chauffage et la ventilation pendant l'hiver 1850-1851. Il résulte de ces tableaux :

1° Que pour les bâtiments dans lesquels les prises d'air étaient ouvertes sur le corridor, la consommation de combustible pour le chauffage a été de 400 kilogrammes par bâtiment et par jour, pour obtenir une température moyenne intérieure de 15°,15, avec une température extérieure de 3°,89, et par conséquent pour un excès de 11°,25; 2° que pour les bâtiments dont les prises d'air étaient extérieures, la consommation moyenne par bâtiment et par jour a été de 500 kilogrammes pour obtenir une température moyenne intérieure moins élevée de près de 1 degré; 3° que la consommation moyenne de combustible pour le chauffage de l'administration a été de 150 kilogrammes par jour pour les mêmes circonstances atmosphériques.

Pour les sept mois de chauffage, pendant lesquels la température moyenne à Paris est à peu près de 6°,50; en supposant une température intérieure constante de 14 degrés, l'excès moyen serait de 7°,50 et la consommation moyenne par bâtiment et par heure serait de 270 kilogrammes, et de 100 kilogrammes pour l'administration. Ainsi la dépense totale serait de $270.6 + 100 = 1720$ kilogrammes par jour.

Quant à la ventilation, la dépense moyenne de combustible est de 350 kilogrammes par jour d'hiver, et de 400 kilogrammes par jour pour le reste de l'année; mais pour obtenir une ventilation de 30 000 mètres cubes par heure, la consommation de combustible est de 20 kilogrammes par heure en hiver, et de 25 kilogrammes en été.

Conséquences des faits observés. En admettant une consommation de 20 kilogrammes de houille par heure pour une ventilation de 30 000 mètres cubes d'air par heure, et une température extérieure de 7°,5, l'accroissement de température de l'air dans la cheminée sera donné par l'équation $20.7000 = 30000, 1,3. x : 4$; d'où l'on tire $x = 14,35$; la température de cet air sera $14,35 + 14 = 28,35$, et son excès sur l'air extérieur de $28°,35 - 7°,50 = 20°,85$. Je n'ai point égard à l'échauffement de l'air par le tuyau à fumée des générateurs, qui est placé dans la cheminée d'appel, parce que l'influence de cet échauffement est très-faible, comme le constatent les expériences du tableau D citées plus haut. La hauteur de la cheminée étant de 29 mètres, la vitesse théorique de l'air chaud s'obtiendra par la formule

$$v = \sqrt{2g \text{Ha} (t' - t)} = \sqrt{19,62.29.0,00365.20,85} = 6^m,58,$$

et la vitesse d'accès de l'air à 14 degrés sera $6,58 : (1 + 0,00365.14,35) = 6^m,25$. Or, la cheminée est cylindrique, de 2^m,15 de diamètre et de 3^m,62 de section, et comme elle renferme le tuyau à fumée des calorifères, qui a 0^m,80 de diamètre et 0^m,50 de section, il s'ensuit que la section du canal, par lequel s'écoule l'air de ventilation, est seulement de 3^m,62 — 0^m,50 = 3^m,12. La cheminée évacuant 30 000 mètres cubes d'air par heure, ou 8^m,33 par seconde, la vitesse d'accès sera de $8,33 : 3,12 = 2,67$. Ainsi,

la vitesse réelle n'est que $2,67 : 6,25 = 0,427$ de la vitesse théorique, et par conséquent le travail réel n'est que $(0,427)^2 = 0,18$ du travail que produirait la cheminée s'il n'y avait pas de frottements dans tout le parcours de l'air, depuis les orifices d'accès de l'air extérieur jusqu'au sommet de la cheminée, pour le même volume d'air appelé.

Dans ce mode de chauffage de l'air à son entrée dans la cheminée, l'uniformité de ventilation est obtenue par l'uniformité de consommation du foyer, attendu que les variations de températures extérieures pendant chaque saison sont sans influence sensible, et que les variations de peu de durée de l'activité du foyer n'apportent aucune perturbation dans la ventilation, comme les expériences le démontrent. Il serait utile cependant qu'il y eût dans la cheminée un anémomètre à pression, fixe, qui indiquerait à chaque instant l'état de la ventilation; il servirait de contrôle permanent du travail du chauffeur.

La surface totale des murailles exposées au contact de l'air est à très-peu près de 13 000 mètres carrés, non compris les surfaces des voûtes et du sol, qui transmettent fort peu de chaleur; leur épaisseur est de $0^m,60$. La surface totale des vitres est de 2173 mètres carrés. En admettant le nombre 15 pour la quantité de chaleur transmise par mètre carré de murailles et par heure (chap. II, art. 35), et 22 pour la transmission des vitres dans les mêmes circonstances (chap. II, art. 43), la quantité totale de chaleur perdue moyennement par les vitres et les murailles sera $13000.15 + 2173.22 = 242806$. Pour obtenir la quantité totale de chaleur fournie par les calorifères, il faut, à cette quantité de chaleur, ajouter celle qui est nécessaire pour élever 30 000 mètres cubes d'air de $7^{\circ},5$ à 14, puisque l'air sort des cellules à 14 degrés, quantité qui est égale à $30000.1,3.6,5.0,25 = 63375$, et en retrancher les 40 unités de chaleur produites par chaque détenu, qui est égale à $40.1200 = 48000$. On trouve ainsi, $242806 + 63375 - 48000 = 258181$, quantité de chaleur qui, à raison de 3750 unités par kilogramme de houille (valeur moyenne représentant la production de 7 kilogrammes de vapeur, l'eau d'alimentation étant à 100 degrés), équivaut à $68^t,85$ de houille, et par jour $68,85.24 = 1652^t,4$, tandis que pour les six bâtiments la consommation moyenne est de $270.6 = 1620$ kilogrammes. La différence est certainement aussi petite qu'on pouvait l'espérer.

Description de la prison Mazas. Planche I^{re}. Plan des bâtiments au niveau du sol. A passage d'entrée; B cour de l'administration; C corps de garde; D magasins; E salle des morts; F cuisine; G passage du greffe; H greffe; I, I salle des fouilleuses; J, J salle provisoire de dépôt; J' panneterie; K cabinet du directeur; K', K', K' chemin de ronde; L salle centrale; au-dessus du bureau du surveillant se trouve l'autel. De cette salle centrale partent six corps de bâtiments M, M, M, ... séparés en deux parties égales par un corridor qui s'élève jusqu'à la toiture, il est éclairé par la partie supérieure et par un immense vitrage qui le termine. De chaque côté du corridor, le rez-de-chaussée, le premier et le deuxième étage des bâtiments sont divisés en cellules; celles du premier et du deuxième étage sont desservies par un balcon qui règne dans toute la longueur des bâtiments. Les balustrades en fer des balcons opposés servent de rails à un chariot contenant les rations des prisonniers, que les gardiens distribuent aux détenus. Les chariots

sont chargés à la cuisine, un chemin de fer les conduit à la descente des caves P, où ils sont reçus sur un autre chemin de fer; des treuils, disposés dans chaque aile en Q, enlèvent les chariots à la hauteur de l'étage où la distribution doit être faite. Ce service dure trois minutes. Pendant le service divin les portes des cellules sont entr'ouvertes à peu près de 0^m,06, de manière que les détenus puissent voir le prêtre à l'autel sans se voir ni communiquer entre eux. O, O, ..., parlours; chaque détenu et chaque visiteur a son cabinet. P descente du passage des vivres. Q passage dans l'épaisseur des voûtes pour les chariots de vivres. N, ..., préaux cellulaires des prisonniers; ils y descendent un à un par les escaliers R, et sont dirigés du centre S dans chaque petite cour; la partie centrale est occupée par une petite tour dans laquelle se tient le surveillant; l'extrémité de chaque cour, la plus éloignée du centre, est couverte de manière à présenter un abri au prisonnier. T usine à gaz. U cheminée générale de ventilation. V cellules de bains. L'infirmerie se trouve dans le premier bâtiment de droite au premier étage; chaque malade a une cellule double.

Planche II. Figure 1. Coupe verticale d'un des bâtiments cellulaires. Chaque cellule a 3^m,75 de longueur, 2 mètres de largeur et 3 mètres de hauteur; chacune renferme un bec de gaz et une cuvette d'aisance C, dont le tuyau de descente sert à l'écoulement de l'air de ventilation dans une cave qui communique avec la grande cheminée d'appel; l'air passe entre le couvercle et les bords de la cuvette. A et B sont deux tuyaux de fonte horizontaux parcourus en sens contraire par de l'eau chaude; ils sont placés dans un canal situé au-dessous du balcon et fermés par une cloison en plâtre; ce canal est interrompu par des cloisons transversales placées dans les axes des murs de séparation des cellules; l'air du corridor s'introduit dans le canal par des orifices percés dans la cloison en plâtre et pénètre dans chaque cellule par les orifices D fermés par des plaques de fonte à jour. E fenêtres des cellules. F fenêtre grillée qui ferme l'extrémité du corridor. G vases d'expansion des circulations d'eau. — Figure 2. Plan des caves où sont placés les générateurs. A générateurs; ils sont au nombre de six. B tuyau souterrain qui conduit les fumées à la cheminée commune B'. C réservoirs d'alimentation des chaudières. D tuyaux de conduite de la vapeur. E vases pleins d'eau chauffée par la vapeur et qui servent au chauffage des cellules du rez-de-chaussée.

Planche III. Figure 1. Coupe horizontale au-dessous du sol, représentant les canaux de ventilation. A caves situées au-dessous des corridors des bâtiments cellulaires, renfermant les tonneaux de vidange dans lesquels viennent déboucher les tuyaux de descente des matières fécales et de l'air vicié des cellules; ces caves ont une double porte à l'extrémité B. C caniveaux rétrécis à leurs extrémités, qui conduisent l'air vicié au canal annulaire D, communiquant avec la cheminée d'appel E. La figure 2 représente, sur une plus grande échelle, la partie centrale du circuit. — Figure 3. Coupe verticale de la figure 2 suivant l'axe du canal circulaire D développé. — Figure 4. Coupe verticale de la figure 2 suivant la ligne brisée *rst*; A, B est un canal circulaire recouvert de plaques de fonte, dans lequel circule une partie de la fumée des générateurs, pour chauffer la rotonde. — Figures 5 et 6. Coupes suivant deux plans verticaux rectangulaires du canal *ab* (fig. 2), qui font voir la disposition des registres qui servent à régler la ventilation

générale des différents bâtiments. — Figure 7. Coupe verticale suivant xy (fig. 2); l'air s'écoule entre les deux voûtes dans l'espace ab ; l'espace qui se trouve au-dessous est traversé par le chemin des chariots qui transportent les aliments aux détenus. — Figures 8 et 9. Coupe verticale suivant tn (fig. 2) et coupe horizontale de la cheminée d'appel. A cheminée des générateurs; B foyer d'appel; C couronne de fonte percée à la partie supérieure d'un grand nombre d'orifices, elle reçoit une partie des gaz qui se dégagent du foyer et la distribue uniformément dans la section de la cheminée; D tuyau qui conduit dans la cheminée commune des générateurs la fumée qui a circulé sous les plaques de fonte de la rotonde.

Planche IV. La figure 1 représente une coupe d'un des bâtiments cellulaires dans la partie la plus voisine de la rotonde, en avant des cellules. A réservoirs d'eau chauffés par la vapeur, qui alimentent les tuyaux qui circulent sous les balcons. B balustrades de deux petits ponts qui traversent le corridor, et au-dessous desquels se trouvent des tuyaux à eau chaude qui correspondent avec la circulation du côté droit. C sont des vases communiquant avec les tuyaux d'eau chaude destinés à permettre la dilatation de l'eau et à maintenir les tuyaux constamment pleins; ils sont placés à l'extrémité opposée de la galerie: dans cette coupe la voûte est moins élevée que dans la partie du bâtiment occupée par les cellules. D réservoir d'eau froide pour le service des détenus. E espace parcouru par l'air de ventilation; la grille qu'on y remarque a pour objet d'intercepter les communications. Les figures 2, 3 et 4 représentent l'élévation, une coupe verticale et une coupe horizontale d'un réservoir d'eau chaude. — Figure 5. Élévation à une plus grande échelle d'un vase d'expansion. — Figures 6 et 7. Élévation et coupe d'un compensateur. — Figures 8 et 9. Élévation et coupe verticale d'un robinet à vanne. — Figure 10. Coupe du canal situé sous les balcons, et qui renferme les tuyaux de chauffage.

Planche V. Figure 1. Coupe verticale d'un des bâtiments par un plan parallèle à l'axe, à une distance d'une face où se trouvent les portes des cellules, égale à peu près à la moitié de la largeur du balcon. A vase dans lequel l'eau est chauffée par la vapeur; B tuyaux de circulation; C vases d'expansion; D tuyaux de descente des matières fécales; D' orifices d'accès de l'air du corridor dans les conduits chauffés par les tuyaux d'eau chaude; D'' orifices d'accès pour les conduits qui se trouvent au-dessous du sol; E orifices d'accès de l'air chaud dans les cellules; F portes des cellules; G guichets; H plaques de tôle verticales, que le détenu abaisse à volonté lorsqu'il a besoin de parler à un gardien¹. — Figure 2. Coupe horizontale d'un bâtiment; A cuvettes d'aisance; B canaux parcourus par l'air chaud². — Figure 3. Coupe verticale de l'extrémité d'un des caveaux qui

¹ On voit dans cette figure, entre deux cloisons transversales, a et b , en face d'une cellule, quatre orifices, c , d , e , f , mais il n'en reste plus qu'un seul, l'orifice d , qui amène l'air dans la cellule; l'orifice c était destiné à amener l'air pris à l'extérieur, il a été remplacé par celui qui est représenté par la lettre D'; les deux autres qui étaient renfermés dans un petit espace terminé par les cloisons b et g , communiquaient avec des ouvertures pratiquées dans le mur de la cellule en haut et en bas; ils étaient destinés à chauffer en partie la cellule par circulation, à une époque où l'on pensait qu'une ventilation de 10 mètres cubes d'air par cellule et par heure suffirait à l'assainissement, ils ont été supprimés ainsi que la cloison g .

² Les canaux verticaux pratiqués dans l'épaisseur de la muraille, qui sont représentés par la lettre m , communiquaient avec l'orifice f (fig. 1), indiqué dans la note précédente.

existe sous chaque bâtiment; chacun des tuyaux de descente est garni latéralement d'un ajutage par lequel se dégage l'air; il est recouvert d'une espèce de bouchon qui l'enveloppe et qui est garni au fond de foin; cette disposition a pour objet d'atténuer le son, de manière que les détenus ne puissent pas s'entendre; c'est en enfonçant plus ou moins le bouchon qu'on règle la ventilation de la cellule. — Figure 4. Projection horizontale du même caveau; on voit dans cette dernière figure le petit chemin de fer et le chariot employé pour enlever les tonneaux, ainsi que les deux portes qui ne permettent jamais à l'air appelé par la cheminée de pénétrer par les caveaux.

Résumé des rapports faits par diverses commissions. Dans le mois de juin 1850, à la suite d'un article du journal le *Siècle*, qui renfermait des plaintes très-vives de certains détenus de la prison Mazas, le Préfet de police nomma le 25 juin une commission ayant pour objet d'examiner l'état sanitaire de cette prison. Cette commission était composée de MM. Thierry, Guérard, Paillard de Villeneuve, Besuchet de Saunois, Beguin, Broutrou, Bruzard, et Perrée gérant du *Siècle*.

A l'époque de la nomination de cette commission, celle qui avait été chargée de l'examen des appareils de chauffage et de ventilation n'avait point terminé son travail, et le changement de position des prises d'air n'était point encore effectué dans tous les bâtiments. Cette dernière commission jugea convenable de remettre à la nouvelle une note sur l'état des choses, et son opinion sur la faculté d'ouvrir les fenêtres qui était réclamée très-vivement par un certain nombre de détenus. Comme cette question est d'une haute importance pour les maisons cellulaires, je rapporterai succinctement la partie de la note relative à cet objet.

Lorsque la fenêtre d'une cellule est ouverte, en supposant la cuvette exactement fermée par un tampon, on peut supposer l'air calme, un vent tendant à introduire l'air extérieur dans la cellule, ou animé d'un mouvement contraire, et, dans chacun de ces cas, la surface extérieure de la muraille éclairée ou non par les rayons solaires.

Dans le premier cas, celui de l'air calme, l'ouverture de la fenêtre produira un renouvellement de l'air de la cellule par l'air extérieur, il en résultera seulement en hiver un refroidissement de la cellule; si le tampon de la cuvette n'était pas fermé exactement, il y aurait un appel d'air chaud, et la cellule se refroidirait moins.

Quand le vent tend à faire entrer l'air dans la cellule, cet air s'écoule dans le corridor; non-seulement la température de la cellule s'abaisse pendant l'hiver, mais, ce qu'il y a de plus grave, l'air vicié par le détenu est rejeté dans le réservoir commun, le corridor. Dans ce cas, une fermeture incomplète du tampon serait sans inconvénient.

Si, par l'ouverture de la fenêtre, l'air de la cellule tendait à s'échapper, ce qui arrive toujours sur les faces des bâtiments opposées à celles qui reçoivent le vent, l'air du corridor affluerait avec une vitesse plus ou moins grande dans la cellule, et si le tampon du siège n'était que posé ou fermait incomplètement, l'air des fosses pourrait être appelé dans la cellule et l'infecterait; et, pour cela, il ne serait pas nécessaire que la diminution de pression extérieure fût très-grande, car pour des ventilations de 10 à 20 mètres cubes d'air par heure; la vitesse d'écoulement de l'air par les sièges, varie dans le tuyau de descente de 0^m,25 à 0^m,50.

Quant à l'action du soleil, il est évident qu'en échauffant les murailles, elle tend à appeler au dehors l'air des cellules, et qu'elle peut produire les effets que nous venons de signaler en dernier lieu.

En résumé, la faculté accordée aux détenus d'ouvrir les fenêtres, s'opposerait à tout système régulier de chauffage et de ventilation, et pourrait avoir de graves inconvénients.

La commission nommée par M. le Préfet de police se divisa en deux sous-commissions, l'une ayant pour objet l'examen des conditions physiques, l'autre celui de la partie morale; M. Guérard fut désigné comme rapporteur de la première, et M. Paillard de Villeneuve de la seconde. Ces deux rapports sont consignés dans le *Moniteur* du 8 août 1850. Nous extrairons de ces deux rapports les passages qui nous paraissent les plus importants.

Premier rapport. « La commission s'est livrée à plusieurs expériences ayant pour but de constater ce mouvement de l'air et d'en mesurer la vitesse. Ainsi, en produisant de la fumée dans un point quelconque de la cellule, nous avons vu cette fumée se diriger vers le siège d'aisance, et s'engager bientôt dans l'espace laissé libre au-dessous du couvercle. C'est pour cette raison, que de l'aveu même des détenus, l'usage du cigare ou de la pipe n'est jamais suivi de la persistance de la fumée dans la cellule; quelques minutes suffisent pour la dissiper. L'expérience suivante en fournit la preuve la moins contestable : trois personnes, dont un membre de la commission, se sont renfermées dans une cellule et y ont fumé sans interruption pendant une heure; la fumée disparaissait à mesure qu'elle était produite, et l'air a conservé sa transparence jusqu'à la fin.

« Quant à la rapidité de la ventilation, l'anémomètre a constaté que chaque cellule reçoit de 10 à 25 et même 30 mètres cubes d'air neuf par heure. Hâtons-nous d'ajouter que d'aussi grandes différences entre les quantités d'air reçues par les diverses cellules dépendent des influences perturbatrices que nous avons reconnues et dont nous parlerons plus loin. Comme ces influences ont été neutralisées dans la sixième division, où viennent d'être exécutées les modifications demandées par la commission, pour la nouvelle disposition des prises d'air, la répartition de l'air introduit par la ventilation est devenue beaucoup moins inégale; aussi les premières expériences exécutées dans cette division donnent-elles, pour le volume d'air introduit par heure dans les cellules, un chiffre qui oscille entre 13 et 22 mètres cubes. Quand le service de régularisation sera complètement terminé, la répartition acquerra une uniformité à peu près parfaite. Mais pour que cette circulation d'air ait lieu sans interruption, il faut : 1° que la cheminée d'appel fonctionne régulièrement; 2° que les caves longitudinales soient bien closes; 3° que l'air extérieur ne soit pas sollicité à se mouvoir en sens contraire par l'action du soleil ou des vents. Or, ces trois conditions se sont trouvées momentanément ou interrompues, ou incomplètement remplies, et c'est ce qui a donné lieu tantôt à une ventilation incomplète, tantôt au refoulement de l'air des sièges d'aisances.

« Enfin, la troisième cause de ventilation irrégulière est celle qui est relative à l'influence perturbatrice exercée par le soleil ou le vent. Cette cause s'est présentée plus

d'une fois, et si elle n'a pas eu assez de puissance pour anéantir complètement l'action de la cheminée d'appel, elle a dû l'amoindrir assez, surtout pendant les derniers jours du mois de juin, où la chaleur a été excessive, pour qu'à certaines heures de la journée quelques détenus aient pu s'en trouver incommodés; toutefois, nous devons déclarer que, dans ces mêmes circonstances, nous avons pu constater à l'anémomètre que la vitesse du courant d'air est encore de 10 mètres cubes par heure, minimum proposé par la commission qui a présidé à l'établissement du système de ventilation.

« C'est ici le lieu de faire observer que, dans nos expériences, nous avons pu nous convaincre que la clôture des fenêtres était essentielle à la régularité de la ventilation; avec les fenêtres ouvertes, et particulièrement sous l'influence du vent, nous avons eu quelquefois un appel en sens contraire, c'est-à-dire que l'air remontait par le siège d'aisance avec une rapidité très-grande et allait même se répandre dans la galerie. Dans une de nos expériences, l'anémomètre nous a indiqué 38 mètres cubes d'air venant de la fosse en une heure. Ce chiffre a été dépassé de beaucoup dans des expériences ultérieures. Quant aux guichets, l'influence de leur état de clôture ou d'ouverture sur la ventilation est à peu près nulle.

« Cette double influence perturbatrice du soleil et du vent avait été signalée par la commission chargée de la réception des appareils de M. Grouvelle, et c'est sur les indications de cette commission que cet ingénieur s'est empressé de changer la place des prises d'air et de les mettre dans l'intérieur même des galeries, où elles sont à l'abri des influences atmosphériques.

« Déjà une division tout entière est disposée d'après ce système, et, comme nous l'avons déjà dit plus haut, les expériences anémométriques exécutées dans ce bâtiment ont justifié complètement les prévisions de la commission et ont montré que désormais la ventilation pourra être obtenue d'une manière complète et régulière.

« D'après les détails dans lesquels nous venons d'entrer, il est permis de conclure que : 1° l'aération des cellules de la prison Mazas peut être effectuée d'une manière satisfaisante pour la santé des détenus; 2° l'occlusion des fenêtres est nécessaire à la régularité de la ventilation.

« Nous ne terminerons pas ce rapport sans faire observer que quelques détenus, bien que soumis à une aération convenable, ont accusé une gêne plus ou moins grande dans la respiration. L'examen de ces détenus nous a fait voir que ce malaise doit être attribué à une disposition malade spéciale. Ainsi, nous avons reconnu chez quelques-uns des affections de la poitrine ou du cœur, qui les exposent à ressentir, même en plein air, la gêne dont ils se plaignent et surtout sous l'influence de la température élevée de l'atmosphère qui régnait au moment de notre visite.

« Un détenu, souffrant de pesanteur de tête et d'étourdissements, nous a avoué avoir été obligé de quitter, par ce motif, sa profession de boulanger, et cela plus de six mois avant son incarcération.

« Enfin, depuis que l'administration a pris possession de la prison Mazas, cinq décès ont eu lieu : deux par suite de phthisie pulmonaire et un troisième par une attaque d'apoplexie. Pour ce dernier, il convient de faire observer que les affections de cette

nature sont extrêmement communes partout à cette époque de l'année. Quant à la phthisie, les médecins ont pu remarquer qu'elle a fait plus de victimes cette année, en mai et juin, qu'à la même époque en 1848. Le rapport, pour l'Hôtel-Dieu en particulier, est de 55 à 40. L'épidémie du choléra n'a pas permis d'établir le rapport avec l'année dernière. Il n'est donc pas étonnant que cette maladie, dont étaient atteints depuis longtemps les deux détenus qui ont succombé à la prison Mazas, ait pris une marche plus rapide après leur détention dans cette maison. La même accélération a pu être observée en ville et dans les hôpitaux.

« C'est aussi à une disposition individuelle de quelques détenus qu'il convient d'attribuer la mauvaise odeur que l'on sent en entrant dans un petit nombre de cellules. Cette odeur, qui persiste malgré une ventilation active et régulière, ne manquerait pas d'être perçue en plein air, et on ne doit pas la considérer comme résultant de l'insuffisance de l'aération.

« Cette circonstance n'est d'ailleurs qu'exceptionnelle, et, sous ce rapport, la prison Mazas offre un contraste frappant avec l'ancienne Force, où les salles habitées en commun par les détenus exhalaient le plus souvent une odeur infecte. »

Second rapport. «
 . . . Un grand nombre de détenus pris au hasard, dans chaque galerie, à chaque étage, ont été interrogés isolément afin de laisser à leurs plaintes plus de liberté. Leur réponse a été presque uniformément la même. Ils ont déclaré que la cellule, comme lieu d'habitation, leur paraissait parfaitement convenable, que la température n'avait rien qui pût les incommoder, qu'ils ne manquaient pas d'air, et que, depuis leur encellulement, ils n'avaient ressenti aucun changement dans leur santé. Plusieurs même ont ajouté qu'ils se considéreraient comme fort heureux si, dans l'état de liberté, ils étaient toujours assurés d'avoir un logement semblable.

« Telle a été la réponse non-seulement de ceux qui n'ont jamais été détenus dans les prisons en commun, mais aussi des récidivistes qui ont déjà passé par les autres prisons ou par les maisons centrales.

« Nous devons cependant constater quelques plaintes. Plusieurs détenus, et la proportion est à peine de un sur trente, ont déclaré qu'ils manquaient d'air et que leur santé en souffrait. La cause de ces plaintes a pu facilement être appréciée à la vue des ventilateurs que les détenus avaient eux-mêmes bouchés, et les expériences faites après la mise des lieux dans leur état primitif ont constaté que la ventilation normale était restituée aux cellules.

« Quant aux plaintes fort peu nombreuses qui n'étaient pas le résultat du dérangement volontaire des appareils, la commission ne peut répondre qu'une chose : c'est que les cellules habitées par les détenus dont les plaintes émanaient, ont été reconnues, par expérience, être dans des conditions de ventilation égales à celles des autres cellules, quelquefois même plus favorables.

« Enfin les états comparatifs des malades et des morts, depuis l'occupation de la prison Mazas, viennent confirmer les expériences faites.

« Les réponses des détenus, sous un autre point de vue, méritent également d'être

signalées, car elles se rattachent intimement au principe moral du régime adopté dans cette nouvelle prison. Tous les détenus interrogés, parmi ceux qui n'avaient jamais vécu dans les prisons en commun, tous, sans exception, ont déclaré qu'ils préféreraient être soumis au régime cellulaire plutôt que d'être confondus avec les autres prisonniers. Le motif de cette préférence est pour tous le même : le régime cellulaire les met à l'abri de tout contact avec des hommes qui pourraient plus tard exploiter contre eux les souvenirs d'une captivité commune, il leur permet, en cas d'acquiescement, de laisser ignorer leur passage dans la prison. Il y a eu sur ce point unanimité, si ce n'est de la part des détenus politiques, qui, tout en déclarant que le régime de l'isolement était excellent pour les détenus de droit commun, se sont plaints de ne pouvoir communiquer entre eux.

« A l'égard des détenus qui ont été soit antérieurement renfermés à la Force, soit arrêtés en récidive après de premières détentions subies dans les maisons centrales ou aux bagnes, la réponse n'a pas été aussi unanime; mais la commission a pu remarquer que la répugnance pour le régime d'isolement se manifestait plus vive chez les détenus, en raison de la gravité des condamnations par eux précédemment subies. Ainsi, l'ancien forçat, l'ancien réclusionnaire demande le régime en commun, tandis qu'au contraire un grand nombre de récidivistes correctionnels ont répondu qu'ils préféreraient l'isolement. Nous en avons vu même un qui regrettait vivement que le système actuel ne leur eût pas été appliqué lors de leur première détention, car c'était par suite des conseils de prison et sous l'excitation d'anciens compagnons de captivité qu'ils avaient, disaient-ils, commis de nouveaux crimes à l'occasion desquels ils sont aujourd'hui poursuivis. Quelques détenus ont aussi demandé comme une faveur, la permission de subir dans leur cellule la peine correctionnelle à laquelle ils ont été condamnés. Au nombre de ces détenus, il s'en trouvait un condamné à treize mois de prison.

« Mais il faut se hâter de le dire, si, pour la presque totalité des détenus, le régime de l'emprisonnement cellulaire est accepté sans répugnance et même avec une sorte de gratitude, c'est à la condition qu'ils auront du travail. Or il faut reconnaître que sur ce point, l'état actuel de la prison appelle de notables améliorations.

« En résumé, la commission est unanime pour déclarer que, d'après l'inspection des lieux, d'après les déclarations des détenus eux-mêmes, le système actuel de l'emprisonnement préventif présente des améliorations incontestables; que, sous le point de vue hygiénique comme sous le point de vue moral, toutes les conditions de bien-être et de moralité peuvent être conciliées, et que, dans sa pensée, elles seraient accomplies par l'adoption des mesures qu'elle a cru devoir indiquer. »

Suivent les noms de tous les membres de la commission, sans exception de celui de M. Pérée, rédacteur de l'article du *Siècle* qui avait provoqué la nomination de la commission. Les mesures réclamées consistaient dans les changements de position des prises d'air, ce qui était déjà en voie d'exécution; dans la surveillance plus exacte du foyer d'appel, des vidanges; dans une meilleure organisation du travail, des punitions, etc.

§ 2. PRISON CELLULAIRE DE PROVINS.

Cette prison est disposée de la même manière que la prison Mazas, mais elle ne renferme qu'un seul bâtiment, et seulement trente-neuf cellules. Les appareils de chauffage et de ventilation ont été construits par M. Grouvelle; ils sont organisés en tous points comme dans la prison Mazas; seulement la chaudière chauffe directement l'eau chaude de circulation, et c'est la chaleur de la fumée de la chaudière qui produit la ventilation d'hiver, celle d'été est effectuée par un foyer d'appel spécial.

La surface des murailles est de 1059 mètres carrés, leur épaisseur moyenne est de 0^m,60; la surface des vitres est de 107^m,50; la cheminée du calorifère a 0^m,31 de diamètre, et s'élève de 5 mètres dans la cheminée d'appel, qui a 18 mètres de hauteur, 1^m,06 de diamètre à la base et 0^m,60 à la partie supérieure.

M. Gentilhomme, architecte, ingénieur civil, attaché à l'administration des hospices de Paris, a été chargé en 1849, par M. le préfet du département de Seine-et-Marne, d'examiner les appareils, de mesurer leurs effets, et de donner son avis sur leur réception ou leur rejet. C'est du rapport de M. Gentilhomme que nous avons extrait ce qui suit.

Observations des températures. Ces observations ont été faites dans quatre cellules de chaque étage : la plus éloignée du départ du tuyau de circulation, la plus rapprochée de ce départ, et deux du milieu de chaque côté, nord et sud. Elles ont eu lieu du 15 mars au 6 avril. Les températures ont été relevées le matin, à midi et le soir.

La moyenne pour les températures du matin a été de 14^o,60; celle de midi de 15^o,35; celle du soir de 14^o,91, et la moyenne de la journée de 14^o,95. La température moyenne de la grande galerie donnant entrée dans les cellules a été de 15^o,16, et celle du greffe de 18 degrés. Dans les cellules exposées au midi, la température moyenne était plus élevée, à peu près de 1 degré, que celle des cellules qui étaient exposées au nord.

Le chauffage était toujours suspendu pendant la nuit, et pourtant l'abaissement de la température pendant l'interruption du chauffage n'a jamais dépassé 0^o,31, à cause de la grande quantité de chaleur renfermée dans les murs et dans l'eau chaude.

La température extérieure moyenne du jour pendant les expériences a été de 6 degrés; mais comme les nuits ont été très-froides, la température moyenne du jour et de la nuit a été beaucoup plus basse. Les déclarations du concierge de la prison, du gardien et de tous les prévenus sur la température pendant les jours les plus froids de l'hiver, sont unanimes et très-satisfaisantes; quelques détenus se sont plaints de la chaleur, aucun du froid.

M. Gentilhomme observe avec raison que si le froid devenait excessif, il serait facile d'y pourvoir en prolongeant le chauffage au delà de sa durée ordinaire.

Ventilation. Les expériences de ventilation ont eu lieu sur les tuyaux de descente des cellules et dans la cheminée d'appel. Voici les résultats obtenus :

FOYER DE LA CHAUDIÈRE EN PLEIN FEU. — Foyer d'Appel Éteint.

Rez-de-chaussée, volume d'air moyen sorti de chaque cellule par heure	»
1 ^{er} étage, — —	59 ^m ,4
2 ^e étage, — —	81 ^m ,0
Volume d'air écoulé par la cheminée,	3400 ^m ,0

Le volume d'air écoulé par la cheminée, réparti entre les trente-neuf cellules, donne pour chacune une ventilation de 87 mètres cubes; la moyenne des ventilations des cellules, directement mesurée, est seulement de 70 mètres.

FOYER DE LA CHAUDIÈRE ÉTEINT DEPUIS 12 HEURES. — Foyer d'Appel Éteint.

Rez-de-chaussée, volume d'air moyen sorti de chaque cellule par heure	32 ^m ,4
1 ^{er} étage, — —	28 ^m ,8
2 ^e étage, — —	16 ^m ,0
Volume d'air écoulé par la cheminée,	1051 ^m ,0

Le volume d'air écoulé par cellule, déduit de celui qui s'écoule par la cheminée, est de 27 mètres; le volume d'air moyen écoulé par cellule, déduit des observations directes faites sur plusieurs d'entre elles, est de 25^m,7.

FOYERS ÉTEINTS DEPUIS SIX JOURS.

Rez-de-chaussée, côté du midi, volume d'air écoulé par cellule et par heure,	24 ^m ,4
1 ^{er} étage, — —	34 ^m ,5
2 ^e étage, — —	7 ^m ,0
Volume d'air écoulé par la cheminée par heure,	1134 ^m ,0

Dans ces expériences il n'y avait point de feu, ni dans le foyer de la cheminée, ni dans celui du fourneau. La ventilation des cellules dirigées vers le nord était complètement nulle.

FOYER DE LA CHAUDIÈRE ÉTEINT. — Foyer d'Appel Allumé.

Rez-de-chaussée, côté du nord, volume d'air écoulé par cellule et par heure,	64 ^m ,8
— côté du midi, — —	43 ^m ,4
1 ^{er} étage, côté du nord, — —	97 ^m ,2
— côté du midi, — —	72 ^m ,7
2 ^e étage, côté du nord, — —	95 ^m ,7
— côté du midi, — —	80 ^m ,0
Volume d'air écoulé par la cheminée par heure,	2940 ^m ,0

Le volume d'air écoulé par la cheminée, divisé par le nombre 39 des cellules, donne pour la ventilation de chacune d'elles 75^m,4, et la ventilation moyenne des cellules, déduite des expériences faites sur un grand nombre d'entre elles est 75^m,6.

Le chauffage a lieu avec de la tourbe; la consommation moyenne par jour est de 367 kilogr., équivalent à peu près à 175 kilogr. de houille. La consommation moyenne du foyer d'appel n'a point été observée.

Le rapport conclut à l'admission des appareils, attendu : 1° que la température exigée par le marché a été atteinte et pourrait être dépassée; 2° que la ventilation, bien uniformément répartie, dépasse de beaucoup celle qui était exigée; 3° enfin, que par une interruption même assez prolongée des foyers, la température et la ventilation n'éprouvent que des diminutions peu considérables.

Observations. En admettant que la quantité de chaleur transmise par les vitres exposées à l'air, par mètre carré et par heure, soit de 22 unités de chaleur (chap. 2, art 35) et que la chaleur transmise par les murailles dans les mêmes circonstances soit de 15 (chap. 2, art. 43), la quantité totale de chaleur perdue par les vitres et les murailles sera de $107,5 \cdot 22 + 1059 \cdot 15 = 18250$ unités de chaleur; et comme le volume d'air écoulé par heure était de 3400, et la température extérieure de 6°, la quantité de chaleur employée pour chauffer cet air de 6° à 15° ou de 9° était $3400 \cdot 1,3 \cdot 9 : 4 = 9945$; et par conséquent la dépense totale de chaleur était de $18250 + 9945 = 28195$, qui, à raison de 3750 par kilogramme de houille, représente 7,51 kilogr. de houille, ce qui correspond à peu près à une consommation de 180 kilogr. par jour.

Quant à la ventilation, l'avant-dernière série d'expériences ayant été faite lorsque les foyers étaient éteints depuis six jours, la ventilation n'a certainement été produite que par l'excès de température de l'air intérieur sur l'air extérieur. Le diamètre de la cheminée au sommet étant de 0^m,60, sa section est de 0^m,282, et comme le volume d'air écoulé était de 1134 mètres par heure ou de $1134 : 3600 = 0^m,315$ par seconde, il sortait de la cheminée avec une vitesse de $0^m,315 : 0,282 = 1^m,117$. Or, pour un excès de température de 9 degrés et une hauteur de 18 mètres, la vitesse théorique est de 3^m,407; et pour l'appel de l'air à 6°, la vitesse serait $3,407 \cdot (1 - 0,00365 \cdot 9) = 3^m,29$; et par suite le rapport de la vitesse réelle à la vitesse théorique est de 0,33.

Dans les dernières expériences sur la ventilation, lorsque le foyer était allumé, on n'a point mesuré la quantité de combustible brûlé par heure dans le foyer, mais on peut le déduire du résultat précédent, parce que le rapport de la vitesse réelle à la vitesse théorique doit rester le même. Le volume d'air écoulé a été de 2940 mètres par heure et de 0^m,816 par seconde. Alors la vitesse d'entrée de l'air dans la cheminée était de $0^m,816 : 0,282 = 2,893$; la vitesse théorique devait être de $2,893 : 0,33 = 8,76$. D'après cela, on trouve facilement, au moyen de la formule $v = \sqrt{2gt}$, qui dans le cas actuel se réduit à $v = \sqrt{1,29t}$, que l'excès de la température de l'air dans la cheminée devait être de 59 degrés, et que pour produire cette énorme ventilation de 75 mètres cubes par individu et par heure, on a dû dépenser par heure $2940 \cdot 1,3 \cdot (59 - 15) : 4 = 42042$ unités de chaleur, qui correspondent à $42042 : 7500 = 5^m,60$ de houille. Je prends 7500 pour la puissance calorifique de la houille, parce que toute la chaleur qu'elle produit est utilisée. Si on réduisait la ventilation au chiffre de 15 mètres cubes par cellule et par heure, ce qui est bien suffisant, la ventilation totale par heure serait de $39 \cdot 15 = 585$ mètres, de $585 : 3600 = 0,16$ par seconde; la vitesse d'accès dans la cheminée serait de $0,16 : 0,282 = 0,57$; la vitesse théorique serait de $0,57 : 0,33 = 1^m,72$; et pour l'obtenir il suffirait d'un excès de température de quelques degrés dans la cheminée, et d'une dépense de combustible

insignifiante. Si, pour éviter les perturbations provenant des vents, on portait pendant l'été, l'excès de température de la cheminée sur celle de l'air extérieur à 15°, la dépense en unités de chaleur serait de 2801, qui correspond à moins de 1 : 3 de kilogramme de houille; la vitesse théorique serait de 4^m,34; la vitesse réelle, 4,34.0,33 = 1^m,43; le volume écoulé par seconde serait de 1,43.0,282 = 0^m,41; par heure il serait de 0,41.3600 = 1476^m, et par cellule et par heure de 1476 : 39 = 37^m,8.

Ce qui manque à ces appareils de chauffage et de ventilation, ce sont des instruments qui indiqueraient, à chaque instant, l'état de la ventilation, afin qu'on pût toujours la maintenir entre certaines limites; car, s'il est important pour la salubrité qu'elle ne descende pas au-dessous d'un certain point, il est nécessaire, sous le point de vue économique, de ne pas tomber dans des ventilations exagérées qui occasionnent inutilement une grande consommation de combustible. Mais c'est un point sur lequel je reviendrai à la fin de ce chapitre.

§ 3. PRISON CELLULAIRE DE TOURS.

Les détails que je vais donner sont consignés dans un rapport de M. Sagey, ingénieur des mines, membre de la commission de surveillance de la prison de Tours, ou proviennent de renseignements que cet habile ingénieur a bien voulu me transmettre.

Dans le commencement du mois de juillet 1849, le choléra existait dans la ville de Tours, mais avec peu d'intensité et seulement dans les quartiers éloignés de la prison; lorsque le 13 de ce mois cette terrible épidémie se manifesta dans l'intérieur de cet établissement et en quelques heures y prit un développement effrayant. Le 14, Monseigneur l'archevêque avait mis à la disposition du directeur une maison de campagne pour y recevoir les détenus que le choléra avait épargnés; on ne put y transporter que deux hommes. Sur une population de 89 détenus, 58 sont morts. L'administration comptait 22 personnes, hommes, femmes et enfants, 11 ont été atteints et 9 ont succombé.

Dans cette catastrophe, M. Sagey a montré un grand zèle et un grand dévouement. Le rapport qu'il a fait à ce sujet, a pour objet de décrire ce qui s'est passé, mais surtout la recherche des causes du développement si subit et si extraordinaire que le choléra a pris dans la prison, lorsqu'au dehors son action était si faible. En discutant les faits dont il a été témoin, et surtout cette circonstance que toutes les personnes libres, comme les détenus, les hommes les femmes et les enfants, ont été indistinctement attaqués, il est conduit à penser que le choléra s'est développé spontanément dans la prison par son insalubrité. « Il m'est impossible, dit-il, de croire à autre chose qu'à un centre d'infection, tous les faits me montrent avec évidence la maladie et la mort attachées aux murs mêmes de la prison. »

D'après M. Sagey, deux causes exercent une influence fâcheuse sur la santé des dé-

tenus ; la mauvaise qualité de l'eau et l'insuffisance de la nourriture ; et une cause générale agit sur toutes les personnes qui habitent la maison, c'est l'air vicié qu'on y respire. M. Sagey s'est occupé avec beaucoup de persévérance de cette cause générale d'insalubrité ; en le prenant pour guide, je donnerai une description sommaire de la disposition des appareils de chauffage et de ventilation, je rapporterai les effets qu'ils ont produits, j'indiquerai les causes de leur insuffisance et enfin les nouvelles dispositions imaginées par M. Sagey.

La prison de Tours est composée de trois bâtiments égaux, disposés comme ceux de la prison Mazas, et réunis à angles droits. Ces bâtiments renferment 120 cellules, mais 108 seulement peuvent être occupées par les détenus. Au point de croisement des trois corridors se trouve la chapelle ; au-dessous un calorifère à eau chaude. L'eau chaude circule dans des tuyaux horizontaux placés dans des canaux creusés au-dessous du sol et dans les axes des galeries. L'air extérieur pénètre dans ces canaux, s'échauffe contre les tuyaux à eau chaude et se rend dans chaque cellule par un conduit pratiqué dans l'épaisseur du mur. La ventilation des galeries devait avoir lieu, pendant l'hiver, par le foyer du calorifère ; pour cela, sur le sol de chacune des trois galeries, et au milieu de leur longueur se trouvent deux ouvertures couvertes de grilles, terminant des canaux qui aboutissent au cendrier du calorifère. La ventilation d'été des galeries devait être produite par des ouvertures ménagées à chaque étage dans chacun des vitraux qui ferment les extrémités des galeries ; ces ouvertures pouvaient être plus ou moins fermées, par des châssis vitrés, mobiles dans des coulisses. La ventilation des cellules devait avoir lieu, comme à Mazas, par les tuyaux de descente ; les cuvettes d'une forme conique, en fonte émaillée, communiquent à la partie inférieure avec un tuyau qui sort obliquement à travers le mur extérieur et descend verticalement, contre sa surface extérieure, dans la fosse creusée sous le chemin de ronde. Il y a une fosse pour six cellules. Les murailles et les voutes des fosses sont formées de moellons posés à sec, sans mortier. Les fosses, à l'origine, étaient en communication avec deux cheminées du calorifère qui renfermaient, à leur partie inférieure, un poêle à eau chaude. La ventilation d'hiver devait avoir lieu par la chaleur de la fumée, et en été par les poêles à eau chaude. « Les appareils ont été reçus par une commission nommée *ad hoc* et payée, qui n'a fait aucune réserve pour la ventilation qui ne fonctionnait pas alors. »

Mais lorsque les tuyaux de descente ont été posés, on a reconnu qu'ils fournissaient une communication facile entre les détenus : des paroles prononcées à voix basse près de l'ouverture d'un siège étaient entendues distinctement à l'ouverture des autres sièges aboutissant à la même fosse. Pour éviter cet inconvénient, on fit plonger les extrémités inférieures des tuyaux dans des vases pleins d'eau, et plus tard on se contenta de les faire plonger dans du sable qui couvrait le sol des fosses ; mais alors, la communication des tuyaux avec l'air de la fosse a été interceptée, ainsi que le son, on le croyait du moins alors, et il fallut chercher un autre procédé d'aéragé. Les cuvettes ont été garnies d'une enveloppe pourvue d'un tuyau latéral en tôle, qui, après s'être élevé à une certaine hauteur, communique avec un canal creusé dans la muraille aboutissant dans les combles ; là, il se termine par un tuyau en tôle qui entre perpendiculairement dans des

gâines en bois qui débouchent dans les deux cheminées rélargies du calorifère. A partir de ce point, les cheminées n'ont plus que 5 mètres de hauteur.

Le chauffage a mal réussi, du moins pour les cellules du rez-de-chaussée, pour lesquelles l'air n'a pas une force ascensionnelle suffisante.

La ventilation des galeries a été nulle l'hiver comme l'été. « L'appel de l'air des galeries par le foyer du calorifère devait être au moins de 20 mètres cubes par kilogramme de houille brûlée, mais l'air qui s'introduit par les fentes de la fermeture suffit à la marche du foyer. Un jour, sans avertir le chauffeur, j'ai fermé hermétiquement les six grilles des galeries, avec des couvertures de laine, le tirage n'a pas changé, et en soulevant un coin quelconque des couvertures, j'ai reconnu un courant sensible du dehors en dedans; ce courant provient d'une diminution de pression qui se produit en hiver dans la prison, par suite de la ventilation, quand les portes et les fenêtres sont fermées. » La ventilation d'été a été presque constamment nulle, par la difficulté d'ouvrir les châssis supérieurs.

La ventilation d'hiver des cellules a dû être faible, parce que les cheminées dans lesquelles aboutissent les gâines d'évacuation n'ont que 5 mètres de hauteur au-dessus des embouchures des gâines; et d'ailleurs elle devait être irrégulière, car elle dépendait du chauffage.

Pour la ventilation d'été des cellules, on devait employer, dans le projet [primitif, comme nous l'avons dit, les deux poêles à eau chaude placés au bas des cheminées, à 10 mètres en contre-bas des orifices de débouché des gâines dans la cheminée, mais ce mode de ventilation n'a pas même été essayé, car pour faire passer la chaleur des poêles dans l'air fourni par les gâines, il aurait fallu la transporter par de l'air extérieur qui se serait chauffé contre les poêles, ce qui aurait occasionné une très-grande perte de combustible. « Le constructeur a jugé lui-même ce système, en estimant la dépense en combustible pour la ventilation d'été à 14 kilogrammes de houille par heure, tandis que 2 kilogrammes suffiraient avec des appareils convenables, comme l'expérience l'a démontré. Le résultat de cette exagération dans le prix de la ventilation fut qu'on y renonça entièrement. » Mais alors la cheminée verticale dans laquelle aboutissent les gâines en bois, se trouvant, en été, remplie d'air plus froid et par conséquent plus lourd que l'air extérieur, le mouvement a dû s'opérer en descendant et ramener dans les cellules l'odeur que l'on cherche à éloigner. C'est sans doute à cause de ce résultat infaillible, que l'on a fait, après coup, et d'une manière grossière, un trou au sommet de chacun des coudes des tuyaux qui communiquent avec les gâines, de manière à faire déboucher librement dans le grenier toutes les conduites verticales. Comme l'air renfermé dans les combles, pendant l'été, est fortement échauffé par le soleil frappant sur les ardoises, il s'établit par les interstices de la couverture, un petit courant ascendant qui oblige l'air des conduites à s'élever. Il y a là deux forces qui se combattent et se contre-balancent presque, ne produisant guère qu'un état d'équilibre instable, souvent rompu dans un sens défavorable, et qui alors amène dans les cellules des émanations nauséabondes. Mais ce que l'on ne peut se figurer, c'est l'odeur atroce des combles, par suite des gaz infects accumulés depuis longtemps, se renouvelant par un mouvement insensible et cuits

par la chaleur des ardoises. » Il est évident que par suite de l'ouverture des conduites, la ventilation d'hiver était complètement supprimée.

Mais ce n'est pas tout, les tuyaux de descente, comme je l'ai dit, plongeaient par leur partie inférieure, et d'une petite quantité, dans le sable dont on avait rempli en partie les fosses, le son était intercepté, mais la communication des tuyaux avec l'air des fosses ne l'était point ; et comme les murs et les voutes des fosses étaient en pierre sèche, et que le sol environnant était perméable à l'air, il s'ensuit que les tuyaux de descente qui n'étaient pas fermés à leur partie supérieure étaient réellement en communication avec l'air extérieur par l'intermédiaire des fosses. Alors les vents, l'échauffement des tuyaux de descente par l'ardeur du soleil, faisaient monter l'air des fosses dans les cellules. C'est ce que M. Sagey a démontré depuis, par de nombreuses expériences faites quand une ventilation régulière était établie dans les cellules, et que l'air s'écoulait par les cuvettes. Il a d'abord constaté l'existence du courant ascensionnel, et il est toujours parvenu à le faire disparaître quand le tuyau de descente était hermétiquement fermé par le bas, ce qui démontre qu'il ne provenait pas de fissures dans les joints et les soudures.

Ainsi, point de ventilation dans aucune saison, ni pour les cellules, ni pour les galeries ; l'air des cellules vicié par les vapeurs qui s'élevaient des tuyaux de descente, non fermés à leur partie supérieure ; les cellules en communication directe par les tuyaux d'ascension et de descente avec deux foyers permanents d'infection, les fosses et les combles, dont l'air, par l'action des vents et du soleil, se mouvait tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, mais toujours en passant par les cellules, et enfin les cellules en communication directe avec les galeries. Voilà ce qui existait dans la prison de Tours en 1849 ; il serait difficile d'imaginer une réunion de circonstances plus déplorable. On comprend d'après cela la cause des ravages affreux que le choléra y a produits.

M. Sagey, qui était entré dans la commission peu de temps avant le triste événement dont nous venons de parler, s'est occupé avec beaucoup de zèle et de persévérance des moyens qu'il fallait employer pour en éviter le retour. Voici ce qui a été exécuté sous ses ordres, avec l'approbation du conseil général.

La ventilation d'hiver des galeries a été obtenue en les faisant communiquer avec la partie inférieure d'une cheminée sans usage, au moyen d'un tuyau de zinc de 0^m,30 de diamètre, garni d'une clef de règlement, comme celle des poêles ; le courant est si rapide qu'il faut le modérer sous peine de perdre trop de chaleur ; ce courant provient de la différence entre la température de l'air intérieur et celle de l'air extérieur. La ventilation d'été a été produite par les anciennes dispositions, qui consistaient, comme nous l'avons dit, dans des ouvertures ménagées, à la hauteur de chaque étage, dans les vitraux qui ferment les galeries, mais les châssis vitrés qui les ferment sont mis en mouvement par de petits treuils à manivelle, qui, par des poulies supérieures, permettent d'ouvrir à la fois les orifices des trois étages. « Aujourd'hui, l'air des galeries est aussi pur que celui des jardins qui environnent la prison. »

Pour la ventilation des cellules, on a réparé les gaines en bois des combles qui étaient en très-mauvais état ; elles ont été recouvertes avec un mélange de plâtre et de bourre ; on a bouché les trous qui avaient été pratiqués dans les tuyaux qui amènent l'air des cel-

lules, et on a remplacé les plus mauvais, les plus oxydés, par d'autres en terre cuite. Les gaz venant des cellules par les sièges et les gaines arrivent à la partie supérieure d'une cheminée fermée par le haut et communiquant, à la hauteur du sol, avec une des cheminées du calorifère. Le poêle à eau chaude qu'elle renfermait a été remplacé par un foyer en briques avec grille pour brûler de la houille; et comme le tirage du calorifère aurait pu souffrir de cette disposition, une petite cheminée de 0^m,25 de côté et de 4 mètres de hauteur a été construite dans la grande cheminée pour le service spécial du calorifère. La cheminée a 15 mètres de hauteur et 0^m,18 de section. Pour une consommation de 2^k,73 de mauvaise houille par heure, la ventilation a été à peu près de 15 mètres cubes d'air par cellule et par heure.

Pour constater à chaque instant l'état de la ventilation, M. Sagey a imaginé un instrument fort simple. Il consiste en une tige mobile autour d'un axe horizontal, fixé dans une plaque fermant un orifice qui avait été ménagé dans le canal de descente des gaz; cette tige porte, du côté de la cheminée, une plaque horizontale en cuivre de 0^m,18 de côté; de l'autre côté, la tige est divisée et peut recevoir un petit poids curseur. Sans ce poids, le mouvement descendant de l'air dans la cheminée ferait abaisser la plaque et monter la partie extérieure du levier, mais on rétablit l'équilibre dans la position horizontale en plaçant le poids curseur à une distance convenable de l'axe de rotation; il est évident que le poids du curseur multiplié par sa distance à l'axe de rotation mesure la pression produite par l'air en mouvement.

Par la disposition dont nous venons de parler, on a obtenu une ventilation suffisante et bien régulière, mais la mauvaise odeur subsistait dans certaines cellules. En plaçant un petit anémomètre, fixé dans un tube, à l'orifice de la cuvette, son mouvement rapide indiquait une bonne ventilation et une aspiration énergique dans la plupart des cellules, mais dans celles qui étaient infectes, le mouvement avait lieu en sens contraire, accusant un fort courant ascendant venant du siège et pénétrant dans la cellule; on conçoit quel devait en être l'effet. Ces cellules infectes n'étaient pas toujours les mêmes, et elles ne se trouvaient pas à la fois des deux côtés d'une même galerie; c'est à la suite de ces premières observations, que M. Sagey a été conduit à constater l'influence du soleil et du vent pour faire monter l'air des fosses dans les cellules, dont j'ai déjà parlé. L'hiver, ce sont principalement les cellules du rez-de-chaussée qui éprouvent ce fâcheux effet; mais en été, quand le soleil chauffe les tuyaux de descente, ce sont les étages élevés qui y sont au contraire plus exposés.

J'ai dit qu'en bouchant hermétiquement la partie inférieure des tuyaux de descente, on rétablissait dans les cellules un courant régulier de ventilation; mais il s'en fallait beaucoup que ce courant eût une intensité constante dans toutes. Cette inégalité provenait de plusieurs causes; d'abord de la mauvaise disposition des tuyaux qui amènent l'air des cellules dans les gaines; ces tuyaux étant placés perpendiculairement à la longueur des gaines, produisaient des veines qui rétrécissaient plus ou moins la section; ensuite à des inégalités, des rétrécissements dans les conduites pratiquées dans les murs; enfin, à l'obstruction des tuyaux de conduite par des corps étrangers.

A ce dernier sujet, M. Sagey a fait une observation très-importante; en démontant

plusieurs tuyaux de conduite, il a remarqué que sur 1 mètre environ de hauteur, leur partie inférieure était obstruée par des toiles d'araignées; plus haut, il n'y avait rien. Pour les enlever facilement, on a placé dans chaque tuyau, à 1^m,50 au-dessus du siège, une petite porte qui permet d'y introduire une chaîne ou d'y verser de l'eau. Il a fallu deux fois recourir à ce moyen, à la suite des indications de la balance anémométrique qui dénonçait cette obstruction.

Pour remédier aux inconvénients que je viens de signaler, aux circonstances imprévues et accidentelles, sans tout reconstruire, M. Sagey a surmonté chaque gaine d'une autre en briques et plâtre, qui communique avec elle près de la cheminée de descente; et il introduit dans cette gaine les tuyaux des cellules qui n'ont qu'une trop faible ventilation; les tuyaux sont disposés de manière que les veines d'air appelé aient une direction parallèle à l'axe de la gaine, et n'agissent pas comme des obturateurs pour celles qui précèdent.

Pendant que M. Sagey s'occupait de ces améliorations, certaines résistances à un projet qu'il méditait depuis longtemps ayant disparu, il a pu le réaliser. Il s'agissait de la ventilation par une action mécanique produite par les détenus eux-mêmes. La machine employée par M. Sagey est un ventilateur à force centrifuge, qu'il a donné à la prison.

Le ventilateur est en tôle; il a quatre ailes; 1^m,30 de diamètre; 1^m,40 de largeur; il n'appelle l'air que par une de ses faces; les orifices d'entrée et de sortie sont de 0^m,16. L'air expulsé se rend dans une cheminée dont la section est aussi de 0^m,16. Il fait quatre tours pour un de la manivelle, au moyen d'un engrenage; la manivelle doit faire un tour en deux secondes. On obtient une régularité parfaite dans le mouvement, au moyen d'un pendule placé en face du détenu qui tourne la manivelle. Pour la vitesse de rotation que nous venons d'indiquer, celle de l'air est à peu près de 4^m,50, ce qui correspond à 2800 mètres par heure, et à 26 mètres par cellule et par heure. La résistance est si faible que les détenus tournent ordinairement la manivelle avec une seule main. Chaque détenu, pour un travail continu de deux heures, reçoit 0^f,10. Il y a donc pour eux profit, exercice très-salutaire sans grande fatigue, et conscience de faire une chose utile pour tous; aussi ce travail loin d'être redouté est recherché.

Le ventilateur est placé dans une position qui avait été disposée pour cet objet, lors de l'établissement de la cheminée de descente. En face de la cellule du deuxième étage, on avait pratiqué une ouverture fermée par une trappe mobile autour d'un axe horizontal; lorsqu'elle était placée horizontalement, elle fermait la cheminée et établissait une communication avec le centre du ventilateur. Au-dessus se trouvait la balance anémométrique.

Mais les modifications faites dans les communications des tuyaux d'ascension avec les gaines et cette grande ventilation, n'ont pas suffi pour assainir constamment les cellules, parce que l'air des fosses peut y pénétrer, et que, dans certaines circonstances atmosphériques, la plus grande partie de l'air aspiré vient des fosses, ce qui est attesté par l'insupportable odeur de l'air qui se rend dans le ventilateur. Il fallait donc encore modifier les sièges, de manière à supprimer leur communication permanente avec les fosses.

La nouvelle cuvette est formée de deux vases concentriques en fonte; le vase intérieur,

d'une forme conique, ouvert en dessus et en dessous, est émaillé intérieurement; le vase extérieur communique avec la partie inférieure du vase intérieur; le tuyau de descente à son origine, est fermé par un tampon garni d'une tige terminée par un anneau; le vase enveloppant est garni d'un tuyau qui s'élève dans les gaines des combles; la cuvette est fermée par un couvercle à charnière qui laisse en avant une ouverture pour le passage de l'air; enfin, les tuyaux de descente plongent dans un baquet en bois cerclé en fer, afin d'intercepter toute communication des cellules avec l'air des fosses quand le tampon est enlevé; enfin, à côté du siège se trouve une petite boîte en zinc, garnie d'un couvercle à charnière, destinée à recevoir la balayette, et qui est traversée par le courant d'air qui se rend dans les combles. Ainsi, d'après cette disposition, l'air de la cellule se rend dans la cuvette par l'orifice libre qui se trouve au-dessous du couvercle, passe entre la cuvette et l'enveloppe extérieure, sort par le tuyau latéral, traverse la petite caisse dont nous avons parlé, et se rend dans les gaines. La ventilation est assez efficace pour entraîner tous les gaz qui pourraient se développer à l'origine du tuyau de descente, car M. Sagey y a produit, pendant plusieurs heures, un dégagement d'hydrogène sulfuré, sans qu'aucune trace d'odeur se soit manifestée. Depuis la fin de 1850, où ce système a été appliqué dans une cellule, autrefois des plus infectes, jamais on n'y a ressenti la moindre mauvaise odeur, et cependant l'énergie de la ventilation utile est maintenant diminuée par le grand volume d'air fourni par les fosses.

M. Blouet, architecte de Fontainebleau, chargé par M. le ministre de l'intérieur d'examiner l'état de la prison, a constaté l'exactitude des faits que nous venons de rapporter, et a vérifié, par des mesures anémométriques, les résultats obtenus par la cheminée d'appel et le ventilateur. Le conseil général d'Indre-et-Loire a voté, dans sa dernière session, les fonds nécessaires pour que, dans toutes les cellules, les cuvettes fussent disposées comme celle dont nous venons de parler.

Je reviendrai à la fin de ce chapitre sur les résultats des observations et des expériences de M. Sagey.

§ 4. CHAUFFAGE DE L'ÉGLISE SAINT-ROCH

Les appareils de chauffage de l'église Saint-Roch ont été construits par M. Grouvelle pendant l'hiver de 1845 à 1846. Par suite d'une mauvaise direction du chauffage, comme nous le verrons plus loin, l'appareil produisit peu d'effet pendant les deux hivers suivants. En 1848, MM. Gauthier de Claubry, Thomas, ingénieur civil, professeur à l'École centrale, et Gentilhomme, ingénieur civil, furent nommés experts pour examiner l'état des choses, et M. Pottier, ingénieur civil, fut appelé par la commission pour suivre les expériences, d'après ses indications; elles ont duré soixante-quatre jours consécutifs.

Les détails que je vais donner ont été extraits d'un mémoire publié par M. Pottier

dans le journal intitulé *Comptes rendus des travaux des ingénieurs civils*. Aux détails consignés dans ce mémoire, j'ajouterai quelques calculs, fondés sur les résultats des nouvelles expériences relatives à la transmission de la chaleur.

Disposition et dimensions du bâtiment. L'église Saint-Roch est un bâtiment de 110 à 115 mètres de longueur sur 28 mètres de largeur, et de 15 à 18 mètres de hauteur moyenne; sa superficie est d'environ 3100 à 3200 mètres carrés. Les murailles exposées au refroidissement extérieur ont une surface de 3500 mètres et une épaisseur moyenne de 0^m,50. La surface des vitraux est de 860 mètres carrés. Les murs et piliers intérieurs présentent un volume de 1800 mètres cubes. L'église contient environ 3500 places assises, et réunit, les dimanches ordinaires, de 2000 à 4000 personnes, les fêtes ordinaires, de 4000 à 6000, et les grandes fêtes, de 6000 à 8000.

L'ensemble du vaisseau se divise en trois parties distinctes. La première et la plus grande a 28 mètres de largeur et 68 mètres de longueur; elle comprend la nef principale, les bas côtés, le chœur et les chapelles latérales; la hauteur de la voûte est de 17 à 18 mètres. La seconde partie est formée de la chapelle de la Vierge, chapelle circulaire d'environ 30 mètres de diamètre, y compris les bas côtés, et surmontée d'un dôme d'environ 25 mètres d'élévation. Enfin, dans la partie la plus reculée de l'église, se trouve le calvaire, partie basse, froide, humide, dont les voûtes principales n'ont que 5 mètres d'élévation, et dont les vitraux étaient, à cette époque, dans le plus déplorable état. Cette partie de l'édifice a depuis été l'objet d'une réparation considérable.

Causes de refroidissement. Indépendamment des causes ordinaires de refroidissement par les murailles et les vitres, il y en a une anormale provenant de la fermeture incomplète ou nulle d'un très-grand nombre d'orifices. L'église renferme soixante-quatre fenêtres présentant une surface totale de 860 mètres carrés; toutes ces fenêtres sont en mauvais état, et les plaques de verre, réunies par des lamelles de plomb, laissent à chaque joint un intervalle dont la largeur varie de 1 à 4 millimètres; en outre, chaque fenêtre porte deux panneaux mobiles à charnières, qui offrent par fenêtre un périmètre de 5 à 6 mètres, présentant une ouverture permanente qui, en certains points, a 5 à 6 centimètres de largeur. Enfin, la voûte est percée de quatre-vingt-sept trous destinés à laisser passage aux cordes qui supportent les lustres, ayant en moyenne 0^m,07 de diamètre, et placés à la hauteur de 18 mètres; l'air qui s'en échappe a une vitesse suffisante pour éteindre une bougie. Le relevé minutieux de toutes ces ouvertures a donné pour résultat total une surface de 14^m,15 à une hauteur moyenne de 11^m,20.

Il y a, en outre, six portes donnant à l'extérieur, et un certain nombre de petites portes s'ouvrant sur la sacristie, sur les tribunes, etc.

Système de chauffage. Le système employé par M. Grouvelle consiste en une circulation d'eau chaude à basse pression, dans des caniveaux placés au-dessous du sol, dans lesquels l'air extérieur est appelé, et d'où il sort, après s'être échauffé, par un certain nombre d'orifices placés à la surface du sol.

Dans un caveau circulaire, qui règne sous le pourtour de la chapelle de la Vierge, est placée une chaudière ayant la forme des générateurs à vapeur à deux bouilleurs, d'une puissance de 12 chevaux environ. Un tuyau de fonte, de 0^m,14 de diamètre, dont les

différentes parties sont réunies par des joints à boulon, et d'un développement de 168 mètres, part du sommet de la chaudière et passe sous le bas côté droit de l'église, en s'élevant par une pente d'environ 0^m,03 par mètre; son point culminant est sous l'orgue; il revient par le côté gauche de l'église en suivant la même pente, et finit par aboutir à l'un des bouilleurs de la chaudière. Un petit tuyau additionnel, placé après coup, circule en sens contraire du tuyau principal, parallèlement au tuyau de retour, et finit par déboucher dans ce tuyau à son point culminant, c'est-à-dire sous l'orgue. Une circonstance imprévue a nécessité l'addition de ce tuyau; les plans fournis par la ville indiquaient, sous les bas côtés de l'église, une série de caveaux qui n'existent pas, et le refroidissement subi par l'appareil circulant dans la terre, au lieu d'être isolé dans des carnaux, a forcé d'augmenter la surface de chauffe.

Tous ces tuyaux circulent dans un canal dont les parties verticales sont formées de deux murailles en briques, laissant entre elles un certain espace libre, afin de diminuer la perte de chaleur; il est fermé inférieurement par des planches et communique avec les ouvertures pratiquées dans le sol de l'église, par lesquelles l'air chaud doit s'écouler; après chacune de ces ouvertures il est fermé par une cloison en bois transversale, et immédiatement après se trouve une ouverture, dans la surface inférieure, pour admettre l'air extérieur qui, par cette disposition, est échauffé par toute la longueur du tuyau compris entre deux orifices voisins de dégagement d'air chaud.

Un système analogue, mais de plus petite dimension, part de l'autre extrémité de la chaudière et circule au-dessous de la chapelle de la Vierge et du calvaire; le tuyau n'a que 0^m,12 de diamètre et 86 mètres de longueur.

Des valves, placées sur les tuyaux de départ et d'arrivée, permettent de modifier ou même de supprimer complètement la circulation dans chacune des grandes artères. Sous le pourtour de l'artère principale, quatre renflements de 3 mètres de longueur et de 0^m,35 de diamètre augmentent encore la surface de chauffe. Quatre autres renflements, en forme de poêles de différents diamètres, sont placés à l'orifice des bouches principales, et de petits embranchements sans retour, favorisent encore le tirage des bouches qui ne sont pas placées directement sur le parcours.

Pour augmenter l'effet utile du combustible, le tuyau à fumée en tôle, de 0^m,35 de diamètre, sert encore à chauffer de l'air sur un parcours de 7 mètres. Cet air alimente une bouche isolée de la chapelle de la Vierge.

Voici maintenant les principales dimensions de l'appareil. Surface de chauffe de la chaudière, y compris les bouilleurs, 15^m,40; surface de la grille, 0^m,40; surface de refroidissement de la circulation, 164^m,85; volume de l'eau qui s'échauffe, 3^m,008; volume de l'eau qui se refroidit, 4^m,218; volume total de l'eau de l'appareil, 7^m,226; température de l'eau dans la chaudière, 120 degrés; à l'extrémité du tuyau de retour, 102 degrés; température moyenne de l'eau en circulation, 111 degrés; différence maximum de niveau, 3 à 4 mètres. L'air chaud est versé dans l'église par vingt-deux bouches fermées par des grilles; vingt et une ont une surface libre de 0^m,135, et la dernière, celle qui est placée au-dessous de l'orgue, 0^m,400: la somme de ces surfaces est de 3^m,235.

Méthode d'expérimentation. Chaque matin la houille destinée à la consommation du jour était pesée et mise par tas de 200 kilogrammes. Le chauffeur notait sur une ardoise l'heure de la mise en feu, l'heure de l'extinction et l'heure où il entamait chaque nouveau tas; le reste du dernier tas était pesé avec soin.

Cinq fois par jour on observait la température de l'intérieur et de l'extérieur. Dans ce but, dix thermomètres préalablement comparés, étaient suspendus sous les lustres à 2 mètres au-dessus du sol; la moyenne de ces dix thermomètres donnait la température intérieure. Deux thermomètres placés, l'un dans une petite cour attenante au fourneau, l'autre sous le portail, donnaient la température extérieure. Deux autres thermomètres étaient suspendus à 2 mètres au-dessus des bouches de chaleur. Six thermomètres appliqués contre la paroi intérieure des murs latéraux et la face tournée contre ces murs, indiquaient la température de ces parois. Enfin deux thermomètres suspendus sous l'orgue à 8 ou 9 mètres d'élévation, et un troisième suspendu à la naissance de la coupole de la chapelle de la Vierge à 18 ou 20 mètres, servaient à étudier la répartition de la chaleur à différentes hauteurs.

Les résultats de même nature ont été représentés graphiquement par des courbes.

RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES. Par une économie mal entendue, l'église n'avait été chauffée jusqu'alors que par intervalles irréguliers, et jamais d'une manière continue. La température intérieure n'avait jamais pu dépasser 9 à 10 degrés et descendait notablement pendant les gelées.

Le 16 novembre, jour où commença l'expertise, la température extérieure était de 3 à 4 degrés et la température intérieure de 9 degrés.

Du 17 au 27 novembre, par un chauffage non interrompu de jour et de nuit la température intérieure fut amenée successivement à 18 degrés.

Du 27 novembre au 6 décembre, la température de l'église a été maintenue entre 15 et 16 degrés par un chauffage alternatif; et du 6 décembre au 20 janvier à une température de 12 à 13 degrés en faisant varier la durée des chauffages et des intervalles qui les séparaient. Pendant cet intervalle, la température extérieure est restée comprise entre + 5 et + 6 degrés.

Effet produit par la continuité du chauffage. M. Thomas, en examinant la puissance et la disposition de l'appareil, avait pensé dès l'abord, que les faibles résultats obtenus les années précédentes provenaient uniquement de ce que les murailles n'avaient point été amenées au régime, qu'on y parviendrait par un chauffage continu d'un certain nombre de jours, et qu'alors une plus haute température serait obtenue d'une manière permanente avec une moindre dépense de combustible. Ces prévisions ont été parfaitement confirmées par l'expérience. Par un chauffage continu de huit jours la température intérieure, comme nous l'avons dit, s'est élevée progressivement jusqu'à 16 degrés, et même à 18 pendant les offices du dimanche; cette température est insupportable dans un lieu où l'on arrive bien vêtu, aussi beaucoup de personnes avaient été obligées de sortir. En outre, comme nous le verrons plus loin, elle a été obtenue avec une notable économie; on en conçoit facilement la raison, parce que quand la grande masse de l'air, les murailles intérieures et extérieures, ont la température qui correspond à celle qui doit être maintenue

dans l'édifice, il n'y a de pertes de chaleur que par les transmissions régulières; tandis que quand cette condition n'est pas remplie, il y a beaucoup de chaleur absorbée par les murailles et qui se disperse sans utilité.

Chauffage intermittent. Aussitôt que le régime est établi, on ne peut plus chauffer d'une manière continue, il ne faut plus le faire que par intermittence; on peut alors chauffer seulement quelques heures tous les jours, ou attendre que la température intérieure se soit abaissée de 2 ou 3 degrés, et chauffer le temps suffisant pour remonter la température au point de départ. Or, il résulte des expériences faites dans les mêmes circonstances de températures extérieures, que cette dernière méthode est plus économique, car dans le premier cas, la consommation moyenne par heure de trois expériences a été 41^t,02, et dans le second cas seulement de 38^t,35. Cette différence provient de ce qu'il y a toujours une grande perte de chaleur au commencement de chaque chauffage pour amener le fourneau, les canaux, etc. à leur température maximum. La courbe des températures des bouches de chaleur le démontre avec la dernière évidence, dans les chauffages continus, l'air chaud n'atteint son maximum qu'après trois jours. Ainsi le mode de chauffage le plus économique consisterait à laisser le vaisseau se refroidir de quelques degrés, au-dessous de la moyenne et à le chauffer d'une manière continue de quelques degrés au-dessus.

Maximum de puissance de l'appareil. Lorsque la température intérieure restant constante, la température extérieure s'abaisse, la vitesse du refroidissement augmente, alors il faut un chauffage plus vif et plus soutenu pour maintenir la température intérieure, et on conçoit facilement que quand l'appareil par un chauffage continu sera amené à produire son maximum d'effet, la température intérieure s'abaissera de manière que sa différence avec la température extérieure reste constante.

On a eu deux fois l'occasion de constater ainsi le maximum de puissance de l'appareil, le 21 décembre et le 2 janvier, jours où la température a baissé subitement en une nuit de 8 à 10 degrés pour tomber à —3 ou à —6 degrés. On a remarqué alors que malgré que le chauffage fût permanent, la température intérieure s'abassa brusquement de manière que son excès sur celle de l'air extérieur se maintint à 16 degrés. Ainsi c'est cet effet qui mesure le maximum de puissance de l'appareil.

Pour une température extérieure de —6 degrés la température intérieure serait donc seulement de 10 degrés. Ainsi l'appareil serait insuffisant pour maintenir dans l'église une température de 12 à 13 degrés, quand l'air extérieur est à —6. Mais il est important de remarquer que la température que nous recherchons et qui nous plaît l'hiver, n'est que relative, et elle est d'autant moins élevée que l'air est plus froid. Aussi il a été constaté que la température de l'église n'avait jamais paru si élevée que dans les deux circonstances que nous venons de citer, quoiqu'elle n'eût jamais été aussi basse, parce qu'en y entrant on éprouvait une variation de température de 16 degrés, tandis que la moyenne des différences, pendant l'hiver, est moitié moindre.

Réchauffement spontané de l'église. A partir du 14 janvier, jour où l'on a cessé définitivement le feu, la température de l'église a baissé lentement jusqu'à ce que sa température fût supérieure à celle de l'extérieur de 4 à 5 degrés. La température extérieure

s'étant élevée lentement, la température intérieure a suivi le même mouvement, il était faible, mais bien caractérisé et soutenu depuis trois jours, au bout desquels le temps venant à se refroidir, la température intérieure s'est abaissée de nouveau. On peut se rendre compte de ce phénomène en considérant que la différence des températures des surfaces des murailles est toujours plus petite que celle de l'air intérieur et de l'air extérieur, à cause de la chaleur produite à l'intérieur par les personnes qui s'y trouvent, que quand cette dernière différence n'est que de 5 degrés, la première est très-petite, et qu'un faible réchauffement de l'air extérieur peut changer le sens de la variation de température dans les murailles.

Extrême lenteur du refroidissement. En admettant que la température moyenne de l'hiver soit à Paris de 5 degrés, et que le vaisseau soit maintenu à une température de 12 degrés, la différence est de 7 degrés; et il résulte des expériences que pour cette différence de température la vitesse du refroidissement est si lente qu'il faut interrompre le chauffage pendant cinq à six jours pour obtenir un abaissement de 1 degré.

Influence de la foule et de l'ouverture des portes. Pendant les cérémonies qui appellent un grand nombre de fidèles, la température monte de 1 ou 2 degrés; mais une demi-heure après l'écoulement de la foule, il ne reste plus de trace de cet échauffement. Cet effet, qui paraît singulier au premier abord, résulte de la quantité très-considérable de chaleur que peuvent absorber les murailles.

On n'a observé aucune influence résultant de l'ouverture des portes, quoique à plusieurs reprises cette ouverture ait été maintenue pendant plusieurs heures.

Répartition de la chaleur à différentes hauteurs. Deux thermomètres étaient suspendus sous l'orgue à 8 ou 9 mètres du sol; un troisième était suspendu à la corniche du dôme de la chapelle de la Vierge à 18 ou 20 mètres. Ces trois thermomètres consultés de trois à cinq fois par jour, pendant vingt jours, ont indiqué une température supérieure à a moyenne des dix thermomètres placés à 2 mètres du sol de 0°,25 à 0°,75 et jamais plus.

Le fait dont il est question et que j'avais déjà remarqué dans des circonstances analogues, provient de ce que les courants d'air chaud sont à une température peu élevée, d'une petite section, d'une petite vitesse, et qu'alors leur chaleur se trouve promptement disséminée dans la masse, à cause de la grande faculté dispersive de l'air, d'autant plus que les mouvements produits dans cette masse, par différentes causes dont nous allons parler, tendent encore à en mêler les différentes parties.

Mouvement de l'air dans l'édifice. Contre toutes les surfaces intérieures des murailles, et à une assez grande distance, la température de l'air est constamment inférieure de 0°,75 à 1°,50 à celle de l'air dans la partie centrale; par conséquent il existe un courant d'air froid qui descend le long des murailles: c'est une conséquence nécessaire de leur mode d'échauffement. Une autre circonstance, certainement très-influente, produit encore des mouvements très-variés dans la masse d'air, ce sont les fissures des fenêtres. La somme totale de ces fissures disséminées sur une très-grande étendue présente, comme nous l'avons dit, l'énorme surface de 14 mètres carrés; mais comme les orifices sont très-petits, elles produisent incomparablement moins de ventilation qu'un orifice unique de même sec-

tion; en outre, comme ces orifices sont à des hauteurs très-inégales et distribués à droite et à gauche, non-seulement ils produisent l'écoulement de l'air introduit, mais un certain nombre doivent donner accès à l'air extérieur, même quand l'air extérieur est calme; il est évident que sous l'influence d'un vent qui serait perpendiculaire à une des faces, l'air extérieur entrera par les orifices de cette face et l'air intérieur sortira par la face opposée, parce que derrière cette face la pression atmosphérique sera diminuée.

Prises d'air intérieures. M. Grouvelle n'a disposé qu'un petit nombre de prises d'air intérieures, et elles ne produisent que peu d'effet. C'est une circonstance fâcheuse, car au point de vue hygiénique, il n'y aurait eu aucun inconvénient à reprendre de l'air dans le vaisseau pour l'échauffer de nouveau, et il en serait résulté une notable économie.

Facile propulsion de l'eau à circuler. La moindre différence de niveau et de température suffit pour établir un mouvement prononcé même dans les tuyaux étroits. Sous la circulation principale du calvaire, qui a 0^m,12 de diamètre, est embranché à angle droit un tuyau de 0^m,08 de diamètre et de 23 mètres de longueur, replié sur lui-même et qui revient sur la conduite principale à 0^m,30 du point de départ; l'inclinaison de ce tuyau est très-faible et pourtant la circulation s'y effectue très-bien.

Pour mettre en évidence les variations de température qui ont eu lieu à l'intérieur et à l'extérieur de l'église pendant la durée des expériences, M. Pottier, d'après l'indication de M. Thomas, a représenté ces températures par des courbes. Comme ce tracé graphique a l'avantage de mettre bien en évidence les principaux faits observés, nous l'avons fait graver à l'échelle de $\frac{1}{4}$.

Dans la planche 6, les temps sont comptés sur la ligne AB. Les intervalles *ab* représentent une durée de 24 heures, entre 2 minuits consécutifs du jour indiqué. Les températures correspondantes sont indiquées par des lignes perpendiculaires; la ligne horizontale ponctuée CD correspond à 15 degrés; une hauteur de 0^m,00125 correspond à 1 degré. La courbe supérieure représente les températures moyennes intérieures, dans lesquelles les températures de l'air chaud à 2 mètres au-dessous des bouches entrent pour 1 : 11. La courbe immédiatement au-dessous représente les températures moyennes indiquées par des thermomètres placés loin des bouches de chaleur. La troisième courbe indique la température des faces intérieures des murailles. Enfin la quatrième courbe, celle qui offre le plus de sinuosité, représente les températures extérieures. La teinte claire qui s'étend jusqu'à la courbe la plus élevée indique la durée du chauffage. La teinte grise, plus foncée, représente la consommation de combustible, elle est proportionnelle chaque jour à la surface du rectangle teinté; lorsqu'il n'y a pas eu continuité dans la consommation, elle a été réduite à ce qu'elle aurait été si la consommation eût été uniforme pendant 24 heures. Les nombres placés dans les rectangles teintés représentent les consommations moyennes de combustible par heure.

Dans la 1 ^{re} semaine, du 17 au 24 novembre, la consommation a été de	5560 kil.
Dans la 2 ^e semaine, du 24 novembre au 1 ^{er} décembre, elle a été de. . .	5560 kil.
Dans la 3 ^e semaine, du 1 ^{er} au 8 décembre, de.	2080 kil.
Dans la 4 ^e semaine, du 8 au 15 décembre, de.	1200 kil.
Dans la 5 ^e semaine, du 15 au 22 décembre, de.	1885 kil.

Dans la 6 ^e semaine, du 22 au 29 décembre, de.	4735 kil.
Dans la 7 ^e semaine, du 29 décembre au 5 janvier, de.	5680 kil.
Dans la 8 ^e semaine, du 5 au 12 janvier, de.	3770 kil.
Enfin dans la 9 ^e semaine, du 12 au 18 janvier, de.	1700 kil.

Ainsi la consommation totale a été de 32 170 kilogrammes dans 63 jours, ou de 510 kilogrammes par jour moyen, du 17 novembre au 5 janvier.

Calculs des effets produits par les différentes causes qui disséminent la chaleur. En partant de ce fait bien constaté, que quand l'appareil produit son maximum d'effet la consommation de houille est de 40 kilogrammes par heure pour une différence de température de 16°, on peut comparer les quantités de chaleur produites à celles qui sont dissipées par les causes connues. Dans le cas dont il s'agit, la chaleur est dissipée : 1° par le tuyau à fumée ; 2° par la paroi du fourneau ; 3° par les canaux dans lesquels l'air est échauffé ; 4° par les murs et les vitraux ; 5° par l'écoulement de l'air chaud à travers les nombreux orifices des vitraux.

En assimilant la chaudière aux chaudières à vapeur, chaque kilogramme de houille produirait la quantité de chaleur correspondante à la vaporisation de 7 kilogrammes d'eau à 100°, c'est-à-dire $7.550 = 3850$; la différence entre la puissance calorifique de la houille et ce chiffre, représente la quantité de chaleur perdue par la cheminée et par les parois du fourneau. Ainsi, dans le cas dont il s'agit, la quantité totale de chaleur développée $= 3850.40 = 154\ 000$.

La chaleur transmise par les murailles s'obtiendra au moyen des formules rapportées dans le chapitre II de ce supplément, en prenant 0^m,50 pour l'épaisseur, 16° pour l'excès des températures intérieures et extérieures, et 1,27 pour la conductibilité ; on trouve ainsi, pour la quantité de chaleur transmise par mètre carré et par heure 14,80, et pour la quantité totale de chaleur transmise par les murailles $5835.14,80 = 86\ 358$.

La chaleur transmise par les vitres, d'après les nouvelles formules (chap. II), pour une hauteur de 4 mètres, et une différence de température de 16°, est de 40 unités, et, par conséquent, pour les 850 mètres de vitraux, la quantité totale de chaleur transmise sera $860.40 = 34\ 400$.

On peut négliger la chaleur perdue dans les canaux de circulation des tuyaux à eau chaude et de l'air, parce que cette perte diminue rapidement avec la durée du chauffage, et qu'une partie de la chaleur qui pénètre la paroi des canaux rentre dans l'église par le sol.

Alors, la quantité totale de chaleur perdue par les vitres et les murailles, sera égale à $86\ 358 + 34\ 400 = 120\ 758$; et la perte de chaleur par la ventilation sera de $154\ 000 - 120\ 758 = 33\ 242$.

Si on avait mesuré la vitesse d'écoulement de l'air chaud dans l'église, connaissant la section totale des orifices d'accès, on en aurait déduit le volume, et d'après l'excès de sa température, sur celle de l'air extérieur, on aurait pu calculer la quantité de chaleur apportée dans l'église, qui aurait dû être de 154 000 unités, si nos calculs sont justes. Mais on peut arriver à cette vérification en calculant la ventilation par deux procédés différents qui conduisent sensiblement aux mêmes résultats.

Nous venons de voir que la quantité de chaleur perdue par la ventilation est égale à 33 242 unités ; or, comme l'air qui s'échappe par les fissures des fenêtres est à la température du verre, qui, dans le cas que nous considérons, aurait un excès de température de 8° sur l'air extérieur ; la perte de chaleur par mètre cube d'air serait de $1,3.8.0,25 = 2,60$, et, par suite, le volume d'air qui sortirait par heure de l'église, serait $33\ 242 : 2,60 = 12\ 785$ mètres cubes.

Remarquons maintenant que si l'air qui pénètre dans les canaux de circulation des tuyaux à eau chaude, y arrive à -4° , et, d'après une indication du rapport en question, il en sort à peu près à 38° ; il y éprouve donc un accroissement de température de 42° ; alors en désignant par x le volume d'air chaud écoulé par les bouches, on aurait $x.1,3.42.0,25 = 154\ 000$; d'où l'on tire $x = 11\ 282$, nombre bien voisin de celui que nous avons trouvé d'abord. Ce volume étant en air à 38° , il semble que pour le ramener à 12° , il faudrait le multiplier par le rapport des modules de dilatation, mais il faut remarquer que le nombre 1,3 aurait dû être multiplié par ce rapport inverse, et, par conséquent, que ces deux corrections se détruisent.

La quantité de chaleur perdue par mètre carré et par heure, par les tuyaux pleins d'eau chaude placés dans les canaux parcourus par l'air qui s'échauffe, diffère complètement de ce qu'elle serait si les tuyaux étaient exposés à l'air libre. En effet, la chaleur perdue par ces tuyaux, provient de la chaleur qu'ils transmettent directement à l'air, et de celle transmise à l'air par la surface du canal chauffée par leur rayonnement. Cette chaleur dépend certainement de la vitesse de l'air, et croît avec cette vitesse, suivant des lois inconnues, mais elle diffère peu de celle qui serait perdue par le tuyau exposé à l'air libre, dont la température serait égale à la température moyenne de l'air à son entrée et à sa sortie du canal. Dans le cas dont il s'agit, la quantité de chaleur qui s'échappe par les bouches est de 154 000 unités ; la surface des tuyaux étant de 168 mètres carrés, la chaleur transmise par mètre carré est de $154\ 000 : 165 = 933,3$, pour une température moyenne de l'air égale à $(4 + 38) : 2 = 21$, et un excès moyen de $111 - 21 = 90$. Or, il résulte des formules qui seront données dans le chapitre suivant, que la quantité de chaleur perdue par un cylindre de fonte exposé à l'air, pour une différence de 90° , est égale à 466 pour la perte due au rayonnement, et à 340 pour celle qui provient du contact de l'air, en tout 806, nombre qui diffère peu de celui que nous venons de trouver.

Il est important de remarquer que le volume de l'église étant d'environ 32 000 mètres cubes, et la ventilation étant d'à peu près 10 000 mètres cubes par heure, l'air de l'église est renouvelé huit fois par jour, et que l'air qu'elle contient suffirait à 3200 personnes, pendant une heure, à raison de 10 mètres cubes par personne.

§ 5. CHAUFFAGE ET VENTILATION DU GRAND AMPHITHÉÂTRE DU CONSERVATOIRE
DES ARTS ET MÉTIERS.

Le chauffage et la ventilation de cette grande salle ont lieu par des appareils construits par M. Duvoir-Leblanc. Leurs effets ont été étudiés par M. Mörin, directeur du Conservatoire, et les résultats de ces observations font l'objet d'un mémoire inséré dans les comptes rendus des séances de l'Académie des sciences du 26 avril 1852. Je rapporterai d'abord ce mémoire.

« On possède jusqu'à ce jour si peu de données et de résultats positifs d'expériences sur la ventilation des lieux qui servent d'habitation, ou de réunion à un nombre de personnes plus ou moins considérable, qu'il m'a paru utile de faire exécuter sur cette question, qui intéresse l'hygiène publique, quelques recherches à l'occasion des modifications introduites récemment dans l'appareil de ventilation du grand amphithéâtre du Conservatoire des arts et métiers.

« Mais la première difficulté était de se procurer un instrument propre à mesurer, avec une exactitude suffisante et pendant un temps assez long, la vitesse de l'air dans les conduits qu'il parcourt. Il se produit, en effet, quelquefois, dans le mouvement simultané de l'air dans plusieurs conduits, des perturbations, des interruptions qui exigent que les observations soient prolongées assez longtemps pour qu'on puisse au moins être sûr d'obtenir un résultat moyen suffisamment exact. D'une autre part, on peut avoir à mesurer des vitesses de l'air assez considérables pour que les instruments employés jusqu'à ce jour ne soient pas capables d'y résister. Il m'a donc semblé nécessaire de faire faire un anémomètre qui fût muni de moyens d'observation plus commodes que ceux dont on s'est servi jusqu'ici. J'en ai confié l'exécution à M. Bianchi, ingénieur en instruments, en lui posant les conditions suivantes :

« *Conditions pour la construction de l'anémomètre employé.* 1° L'instrument devait pouvoir mesurer des vitesses de l'air variables depuis 0^m,40 à 0^m,50, jusqu'à 30 ou 40 mètres en 1 seconde;

« 2° Le nombre de tours du moulinet devait être recueilli par un compteur muni d'aiguilles à pointage, pendant un temps qui pourrait être de une heure, ou, pour les grandes vitesses, de 15 à 30 minutes;

« 3° Il fallait que l'instrument fût d'un petit volume pour qu'on pût l'introduire dans des conduits de petites sections, dans des ventilateurs, etc., et qu'il pût être présenté dans différentes directions, selon les circonstances de l'expérience.

« Ces diverses conditions ont été habilement remplies par l'artiste, dans l'instrument que je mets sous les yeux de l'Académie.

« *Description de l'anémomètre.* Le volant à ailettes est fixé sur un arbre en acier très-délié, porté à ses deux extrémités sur deux supports, et vers le milieu sur un troisième

support intermédiaire. Les trous sont garnis de pierre dure. Une vis sans fin conduit une première roue de cent dents, dont l'axe porte une aiguille double à godet, placée devant un cadran émaillé divisé en 100 parties, et sur lequel on peut compter les tours faits par le volant jusqu'à 100. Sur l'axe de la même roue est une autre vis sans fin qui conduit une seconde roue de 100 dents, dont l'axe porte aussi une aiguille double à godet, placée devant un second cadran divisé en 100 parties, et sur lequel l'aiguille peut marquer les tours de la première roue, ou les centaines de tours du volant à ailettes, jusqu'à 10 000. Enfin, sur l'axe de cette seconde roue, est fixé un ergot qui, à chaque tour de cet axe, fait passer une dent d'une roue à minute à 50 dents, ce qui permet de compter jusqu'à 500 000 tours.

« L'appareil de pointage, ingénieusement disposé par M. B. Bianchi, agit simultanément sur les deux aiguilles doubles, en poussant ou en tirant un bouton qui est placé à l'extrémité d'une tige de 0^m,60 de longueur, qui porte l'appareil et qui permet à l'observateur de s'isoler complètement du courant d'air. Cette transmission de mouvement se fait avec une égale facilité, quelle que soit la direction qu'on ait donnée à la boîte qui porte le volant à ailettes et son compteur, laquelle peut tourner dans différentes directions, selon celle où l'on veut observer.

« Des ailettes de rechange et de diamètres variés peuvent être substituées les unes aux autres, selon qu'on veut rendre l'instrument plus ou moins sensible à de faibles vitesses d'air.

« *Tare de l'instrument.* L'opération importante pour pouvoir se servir avec confiance d'un semblable instrument est celle de sa tare, ou la détermination du rapport qui existe entre le nombre des tours faits par les ailettes et les différentes vitesses de l'air. Cette opération n'est pas sans quelques difficultés. Voici comment j'y ai fait procéder :

« Un arbre vertical, muni d'un treuil et portant à sa partie supérieure un bras de levier horizontal de 8 mètres de diamètre, a été disposé dans la nef de l'ancienne église de l'abbaye Saint-Martin. Par un renvoi de poulies, dont l'une était fixée à la charpente supérieure de la nef, à 18 ou 20 mètres, un poids, suspendu à une corde qui venait s'enrouler sur le treuil, transmettait à cet arbre vertical un mouvement que la forme donnée au bras horizontal rendait promptement à peu près uniforme.

« L'anémomètre était placé à l'extrémité du rayon de 4 mètres, formé par le bras horizontal de manière que son axe fût tangent à la circonférence décrite. Un renvoi de mouvement assez simple permettait à un observateur, placé à côté de l'arbre vertical, de faire fonctionner à volonté l'appareil de pointage du compteur, au signal d'un second observateur chargé de compter le nombre des tours de l'arbre vertical. On pouvait ainsi noter simultanément et comparer les nombres de tours de l'arbre vertical, ou la vitesse de transport de l'anémomètre, ainsi que le nombre de tours des ailettes de l'instrument. On remarquera d'ailleurs que la grandeur du rayon de la circonférence parcourue par l'anémomètre était suffisante pour atténuer l'effet de l'obliquité due au mouvement circulaire. On a pu d'ailleurs, en variant les poids moteurs, augmenter graduellement la vitesse jusqu'à 9 ou 10 mètres environ. »

Ces expériences, faites sur plusieurs instruments, ont conduit à la formule suivante :

$$V = a + bn;$$

V étant la vitesse de l'instrument par seconde, n le nombre des tours des ailettes dans le même temps, a et b des constantes variables d'un instrument à un autre.

« *Observations sur le mode de tare de l'instrument.* Ce qui précède suppose que l'action de l'air en repos sur un corps en mouvement, est la même que celle de l'air en mouvement, à même vitesse, sur un corps en repos. Sans prétendre actuellement contester ni admettre la différence que Dubuat a cru pouvoir déduire de ses expériences entre ces deux modes d'action, je me bornerai à dire que, dans le cas actuel, cette différence, si elle existe, doit être assez faible pour être négligée. Il n'y a d'ailleurs pas, que je sache, de moyen connu de procéder autrement que je l'ai fait, et les expériences suivantes confirmeront, je pense, l'assertion précédente ¹.

« La vitesse de transport de l'anémomètre ne pouvant dépasser, avec l'appareil employé, celle de 10 mètres environ en une seconde, j'ai dû chercher un autre moyen d'étendre la tare de l'instrument à des vitesses plus considérables. A cet effet j'ai employé un ventilateur de 0^m,30 de diamètre, à ailes planes dirigées dans le sens du rayon, qui appartient au Conservatoire, et j'ai disposé le tuyau cylindrique, dans lequel il chassait l'air, de façon que ce tuyau eût une section transversale égale à la surface des palettes, toutes les sections du conduit de raccordement de l'orifice rectangulaire de sortie du ventilateur, avec ce tuyau cylindrique, étant aussi de même superficie, de manière à éviter autant que possible l'altération de la vitesse de l'air.

« On a monté ce ventilateur près de la petite machine à vapeur du Conservatoire, et on lui a transmis le mouvement par l'intermédiaire d'un dynamomètre de rotation, par l'emploi de poulies de diamètres convenables; on a pu ainsi faire varier les vitesses du ventilateur depuis 127 tours jusqu'à 2220 en une minute.

« En commençant d'abord à le faire marcher à des vitesses assez faibles, on a pu se servir, pour mesurer la vitesse de l'air dans le tuyau, de la tare faite avec l'appareil de rotation à axe vertical, et déduire du nombre de tours de l'anémomètre la vitesse de l'air dans le tuyau, jusqu'à la limite de 10 à 12 mètres en une seconde.

« En comparant ensuite les vitesses moyennes de sortie de l'air avec celles de la circonférence moyenne des palettes du ventilateur, on a reconnu qu'elles étaient dans un rapport constant, de sorte que la vitesse du ventilateur étant V' , et celle de l'air V , on a eu le rapport

$$\frac{V}{V'} = K, \quad \text{ou} \quad V = KV', \quad \text{et, par suite,} \quad KV' = a + bn, \quad \text{ou} \quad V' = \frac{a}{K} + \frac{b}{K}n;$$

ce qui montrait qu'entre ces limites de vitesses, celles des ailettes du ventilateur étaient proportionnelles à celles des ailettes de l'anémomètre.

« Ceci étant reconnu, on a fait marcher le ventilateur de plus en plus vite, et l'on a noté les nombres de tours n faits par l'anémomètre en une seconde; puis admettant que le rapport constant K trouvé entre les vitesses de l'air et celles du centre des ailes du

1. « Il n'est pas inutile de rappeler ici que les moulinets à ailettes du même genre employés au jaugeage des eaux ont donné des résultats analogues aux précédents, et qu'en particulier les expériences de feu M. Lapointe, sur son tube jaugeur, ont montré que la relation $V = a + bn$ subsistait, même quand les vitesses étaient variables. »

ventilateur, qui étaient connues, restât le même aux grandes vitesses et aux petites, on en a déduit les vitesses moyennes de l'air qui venait choquer les ailettes.

« Reportant ensuite ces nombres de tours comme ordonnées, et les vitesses comme abscisses, sur la même figure qui avait été faite pour les expériences précédentes, on a encore trouvé que les points ainsi déterminés étaient sur le prolongement de la même ligne droite qui avait donné la relation $V = a + bn$. Cette coïncidence des résultats des deux séries d'expériences montre la permanence simultanée des deux relations $V = a + bn$ et $V = KV'$, jusque dans les plus grandes vitesses.

« En effet, puisqu'en prenant pour V les valeurs de KV' , on a encore aux grandes vitesses $KV' = a + bn$, ainsi que le montre le tracé, il s'ensuit que les rapports $a : K$ et $b : K$ sont constants, ce qui ne peut arriver qu'autant que a , b et K sont constants. Car en posant $a : K = c$ et $b : K = c'$, c et c' sont deux nombres constants; on en déduit

$$K = \frac{a}{c}, \text{ et } \frac{b}{K} = \frac{bc}{a} = c'; \text{ d'où } \frac{b}{a} = \frac{c'}{c},$$

ce qui implique nécessairement la constance de b , puisque le coefficient a est indépendant de la vitesse ou du nombre de tours.

« Il résulte de là :

« 1° Que les expériences faites avec le ventilateur ont étendu la tare des anémomètres employés jusqu'à des vitesses de 40 mètres environ, ce qui dépasse les besoins habituels des observations;

« 2° Qu'elles ont prouvé qu'il existe un rapport constant entre la vitesse de rotation des ventilateurs et celle de l'air qu'ils chassent ou qu'ils aspirent dans un tuyau; le rapport dépend d'ailleurs, non-seulement des dimensions des tuyaux, mais encore des ouvertures centrales d'admission dans le ventilateur; ainsi que quelques expériences l'ont constaté et que je le ferai connaître plus tard;

« 3° Qu'à l'avenir, et quand ce rapport de la vitesse de l'air expulsé par un ventilateur donné au nombre de tours de ce ventilateur sera connu, on pourra facilement tarer les anémomètres de différents genres, tant ceux dont on voudra observer les tours, que les anémomètres à pression, à l'aide d'un ventilateur; ce sera beaucoup plus commode que le premier moyen que nous avons employé, et permettra surtout d'étendre la tare à de très-grandes vitesses.

« Après avoir fait cet exposé indispensable des expériences préliminaires à l'aide desquelles on a déterminé la relation qui lie le nombre des tours des ailes d'un anémomètre à la vitesse de l'air qui le choque, passons à l'examen des résultats des expériences faites sur la ventilation du grand amphithéâtre du Conservatoire des arts et métiers, dans les circonstances du service courant.

« *Dispositif de l'appareil de ventilation du grand amphithéâtre du Conservatoire.* La ventilation de ce vaste local, dans lequel se trouvent rassemblés le soir des auditeurs au nombre de sept à huit cents et même plus, et qui chauffé de façon que, quand deux cours se succèdent avec des auditoires parfois très-différents en nombre, la température doive y rester sensiblement la même, présentait d'assez grandes difficultés.

« Un premier dispositif adopté, il y a quelques années, n'avait pas complètement réussi. Les conduits d'aspiration n'avaient guère que 0^m,65 de surface totale de section, et la cheminée 0^m,49, et il n'y avait pas d'appel à la partie supérieure. Par suite de ces proportions trop restreintes, la température s'élevait considérablement, et l'air était vicié dans la partie supérieure de l'amphithéâtre. Plusieurs fois des auditeurs avaient été incommodés. Je m'entendis avec M. l'architecte du Conservatoire, et une modification des dispositions employées fut demandée à M. Léon Duvoir. J'indiquerai en peu de mots le nouveau dispositif.

« Le grand amphithéâtre du Conservatoire est chauffé, pendant les heures des cours publics, à une température qui ne doit pas être inférieure à 15 degrés, d'après les termes du marché, et qui s'élève habituellement à 20 degrés quand il contient 800 personnes ainsi que cela arrive habituellement pour certains cours. Il faut que la température soit sensiblement la même dans toutes les parties de l'amphithéâtre, au bas et au sommet; de plus, il importait d'extraire, sans gêner l'auditoire, une quantité d'air suffisante pour enlever toute émanation désagréable.

« Pour y parvenir, M. Léon Duvoir a ouvert, vers le bas des gradins de l'amphithéâtre, sous les jambes des auditeurs, des orifices d'appel qui sont en communication avec des conduits pratiqués sous les gradins. Ces orifices sont au nombre de 39, dont 34 ont 0^m,08 sur 0,20, et sont répartis sur les deux tiers de la hauteur de l'amphithéâtre, et dont les 5 autres sont situés sous le premier gradin et ont 0^m,15 sur 0^m,60 d'ouverture. Tous ces conduits se réunissent dans une pièce située sous l'amphithéâtre et qui contient le calorifère à eau chaude. Dans cette pièce et à 0^m,50 au-dessus du sol s'ouvrent 4 bouches d'appel prolongées par autant de conduits verticaux qui se réunissent en un seul tuyau horizontal communiquant à une grande cheminée d'appel, au bas de laquelle se trouve un foyer qu'on n'allume qu'en cas de besoin.

« Des tuyaux à circulation d'eau chaude, avec des parties renflées, appelées bouteilles, passent dans le fonds du conduit horizontal pour en échauffer l'air et produire l'aspiration.

« La cheminée verticale contient deux tuyaux en fonte, l'un qui communique au fourneau d'une machine à vapeur, et l'autre toujours chaud qui sert de commencement de cheminée au calorifère.

« Ces deux tuyaux sont raccordés avec deux autres plus petits qui forment la cheminée du petit calorifère auxiliaire, employé pour déterminer ou accélérer au besoin l'appel d'air. En outre, il a été établi, au plafond de l'amphithéâtre, au-dessus de la partie la plus élevée des gradins, une large bouche d'appel qui communique avec un tuyau horizontal, lequel débouche dans la grande cheminée.

« Les sections de passage de l'air expulsé de l'amphithéâtre sont les suivantes :

Orifices d'appel dans la chambre du foyer, à 0 ^m ,50 au-dessous de l'entrée.	$\left\{ \begin{array}{l} \text{N}^{\circ} 1. \text{ A gauche en entrant...} \\ \text{N}^{\circ} 2. \text{ A droite en entrant...} \\ \text{N}^{\circ} 3. \text{ A gauche près du foyer.} \\ \text{N}^{\circ} 4. \text{ A droite près du foyer.} \end{array} \right.$	0,560.0,500 = 0 ^m ,280000
		0,618.0,480 = 0 ^m ,296440
		0,587.0,514 = 0 ^m ,301718
		0,543.0,524 = 0 ^m ,284532
Tuyau au-dessus de l'amphithéâtre, 0,700 sur 0,700.....		0 ^m ,49
Aire totale des orifices d'appel.....		1 ^m ,652890

Cheminée d'appel.

Section prise à hauteur du regard, 1 ^m ,100 sur 1 ^m ,030	1 ^m ,133000
A déduire pour la section des tuyaux de fonte.....	0 ^m ,187000
	0 ^m ,946000
Section libre de passage.....	0 ^m ,946000

« Ainsi, la section de la cheminée n'est que les $0,946 : 1,653 = 0,57$ de celle des orifices d'appel, ce qui nécessite une accélération de la vitesse au débouché des conduits dans la cheminée. On conçoit cependant qu'il est difficile d'éviter cet inconvénient sans être conduit à donner à la cheminée des dimensions bien considérables et bien dispendieuses.

« *Marche suivie dans les expériences.* Pour déterminer la quantité d'air écoulé par les cinq orifices, on reconnut, par de premières expériences, qu'il était à peu près indispensable de prolonger les observations pendant un temps assez long, afin de se mettre à l'abri des perturbations très-notables qui se produisent dans le mouvement de l'air. Il arrive en effet, quelquefois, qu'à une vitesse assez grande succède, sans cause apparente, une vitesse très-faible. De plus, on constata aussi qu'il était nécessaire de placer les anémomètres dans les conduits, à une distance de l'origine au moins égale à la largeur, afin qu'ils fussent dans une portion du courant où les filets fluides marchent à peu près parallèlement.

« Cinq anémomètres étaient à notre disposition; on en plaça quatre d'une manière fixe dans les conduits de la chambre inférieure, et le cinquième servit pour le conduit supérieur.

« En même temps qu'on observait les vitesses de sortie de l'air, on tenait note de la température de l'amphithéâtre; en bas et dans la partie supérieure, du nombre des personnes qu'il contenait, de la température de l'air dans les conduits et à l'extérieur.

« Sans entrer dans le détail de chacune des expériences, nous donnerons le résultat sommaire de chacune d'elles dans le tableau suivant.

« Différentes circonstances ayant empêché quelquefois de faire simultanément les observations à la cheminée supérieure et aux orifices du bas, on a suppléé à ce défaut de résultat pour l'orifice supérieur, en prenant pour son débit normal la moyenne de tous ceux qui ont été observés; ce qui est d'autant plus permis, que ce débit a présenté une assez grande régularité. Ainsi on a trouvé qu'il était,

Le 18 février, de 3999 mètres cubes à l'heure.

Le 1^{er} mars, de 3133 —

Le 7 mars, de 3403 —

Le 8 mars, de 3094 —

Le 12 mars, de 3776 —

ou, en moyenne, de 3481

« C'est cette quantité qui figure marquée d'une astérisque dans le tableau, pour toutes les expériences où l'on n'avait pas pu faire d'observations à l'orifice supérieur, et qui sert à compléter l'évaluation de la quantité d'air évacué. »

Suivent deux tableaux représentant les résultats des expériences ; nous en donnons un résumé en supprimant les détails peu importants.

DATES DES OBSERVATIONS.	Volumes d'air total écoulés par heure par les cinq orifices.	Volumes d'air écoulés par personne et par heure.	TEMPÉRATURES DANS L'AMPHITHÉÂTRE.		TEMPÉRATURES EXTÉRIEURES.
			en haut.	en bas.	
12 février, 450 personnes dans l'amphithéâtre.	10350 ^m ,33	23 ^m ,20	20°,0	19°,0	-1°,2
14 février, 775 personnes dans l'amphithéâtre.	11657 ^m ,97	15 ^m ,04	20°,0	19°,0	+3°,4
18 février, 850 à 900 personnes dans l'amphithéâtre.	12711 ^m ,17	16 ^m ,00	20°,0	18°,5	+7°,2
27 février, 800 personnes dans l'amphithéâtre.	12550 ^m ,46	17 ^m ,40	20°,0	18°,5	+1°,7
1 ^{er} mars, 725 à 750 personnes dans l'amphithéâtre.	11976 ^m ,78	16 ^m ,60	19°,5	18°,5	+5°,2
2 mars, 750 personnes dans l'amphithéâtre: l'orifice n° 2 est resté bouché pendant l'expérience.	10052 ^m ,96	14 ^m ,20	20°,0	18°,5	+6°,4
7 mars, 800 personnes : l'orifice n° 2 est resté bouché pendant l'expérience.	7133 ^m ,94	8 ^m ,9	20°,0	18°,50	+7°,4
8 mars, 800 personnes : l'orifice n° 2 est resté bouché.	7384 ^m ,39	9 ^m ,25	20°,0	19°,0	+8°,1
12 mars, 800 personnes.	9556 ^m ,39	11 ^m ,90	20°,0	19°,0	+5°,3

Dans le tableau qui suit, les quatre premiers nombres placés à la suite de la date d'une expérience sont les volumes d'air appelés par heure par les orifices qui débouchent dans

la chambre du foyer de la cheminée d'appel; le cinquième, le volume d'air appelé par l'orifice de la partie supérieure de l'amphithéâtre; le sixième, le volume d'air total appelé; au-dessous et, entre parenthèses, sont les volumes d'air appelés par mètre carré de section et par heure.

12 février.....	2089 ^m ,58 (7090)	2086 ^m ,46 (7050)	1517 ^m ,52 (5020)	1175 ^m ,76 (4140)	3481 ^m ,00 (7104)*	10350,33
14 février.....	2287 ^m ,15 (8200)	2509 ^m ,56 (8450)	1590 ^m ,55 (5300)	1789 ^m ,70 (6300)	3481 ^m ,00* (7104)*	11657,97
18 février.....	2167 ^m ,20 (7750)	2081 ^m ,21 (7400)	2181 ^m ,99 (7400)	2281 ^m ,71 (8050)	3998 ^m ,99 (8120)	12711,17
27 février.....	2244 ^m ,81 (8000)	2443 ^m ,10 (8250)	1887 ^m ,62 (6280)	2493 ^m ,92 (8800)	3481 ^m ,00* (7104)*	12550,46
1 ^{er} mars.....	1870 ^m ,85 (6700)	2063 ^m ,55 (8950)	2178 ^m ,18 (7250)	2383 ^m ,2 (8400)	3481 ^m ,00 (7104)	11976,78
2 mars.....	2256 ^m ,91 (8080)	0	2317 ^m ,82 (7700)	2345 ^m ,36 (8250)	3132 ^m ,64 (6400)	10052,96
7 mars.....	1098 ^m ,72 (3920)	0	1277 ^m ,35 (4240)	1355 ^m ,12 (4760)	3402 ^m ,75 (4950)	7133,94
8 mars.....	1521 ^m ,07 (5490)	0	1455 ^m ,48 (4830)	1313 ^m ,74 (4620)	3094 ^m ,05 (6300)	7384,39
12 mars.....	1372 ^m ,89 (4900)	1240 ^m ,97 (4180)	1793 ^m ,88 (5950)	1372 ^m ,43 (4830)	3776 ^m ,17 (7700)	9556,39

« *Remarque.* L'expérience du 18 février a été répétée avec un petit anémomètre du système employé par M. Combes, et dont la tare avait conduit à la formule $V = 0^m,15 + 0,10 N$, V étant la vitesse par seconde, N le nombre de tours par seconde, on a obtenu les résultats suivants :

	DURÉE	NOMBRES	VOLUMES D'AIR
	DE L'EXPÉRIENCE.	DE TOURS.	ÉCOULÉS EN UNE HEURE.
Orifice n° 1.....	120 minutes.	2360	2095 mètres.
— 2.....	120 —	1700	1692 —
— 3.....	120 —	1620	1847 —
— 4.....	120 —	1760	1891 —
Conduit supérieur...	120 —	2020	3355 —
		TOTAL....	10880 mètres

« On voit par le tableau précédent que l'expérience faite avec le nouvel anémomètre a

donné un produit total de 12 711^m,11 par heure, supérieur de 1831 mètres cubes ou de $1 : 5,95 = 0,168$ à celui qu'a fourni l'anémomètre plus léger de M. Combes, mais avec lequel les observations sont toujours entachées d'une erreur en moins, à cause du temps nécessaire pour imprimer à l'instrument qui part du repos une vitesse régulière. Il s'ensuit que le nouvel anémomètre qui peut résister à de grandes vitesses, a pour celle de 1 mètre et au delà, une sensibilité au moins égale, sinon supérieure à celle de l'anémomètre de M. Combes.

« *Examen des résultats.* Les nombres entre parenthèses du dernier tableau sont les volumes d'air écoulés, par mètre carré, de chacun des conduits dans chaque expérience; on remarque que dans le cas où les volumes d'air évacués n'ont pas atteint 11 à 12 000 mètres cubes d'air par heure, il y a des irrégularités assez grandes, ce qui tient sans doute à ce que l'appel n'était pas assez énergique; au contraire, quand le volume d'air sorti a atteint ou dépassé les chiffres précédents, la vitesse observée et le volume d'air évacué par chaque mètre carré de section ont été à peu près les mêmes.

« On a fait varier l'aire totale des passages en tenant fermé l'orifice n° 2, et le volume d'air a diminué en proportion des surfaces, sans que la vitesse ait sensiblement changé; ce qui montre combien il importe d'ouvrir de larges passages à l'évacuation.

« Dans les expériences qui ont fourni le plus grand volume d'air, la vitesse n'a pas dépassé de beaucoup 2 mètres à 2^m,15 dans les conduits; et dans celles qui en ont donné le moins, cette vitesse n'est pas descendue au-dessous de 1 mètre à 1^m,10.

« Les 12, 14 et 27 février, jours pendant lesquels la température a été assez basse et voisine de zéro, le volume d'air s'est accru avec le nombre des auditeurs, mais dans une assez faible proportion, comme on peut le voir dans le résumé suivant :

	Février.		
	12	14	18
Nombre d'auditeurs.	450	775	800 à 850
Volumes d'air évacués en une heure.	10 350	11 657	12 711.

« Ainsi, l'influence du nombre des auditeurs n'est pas assez grande dans le cas actuel, pour qu'il soit indispensable d'en tenir compte dans l'établissement des appareils.

« Il n'en serait sans doute pas de même pour des réunions très-nombreuses de personnes échauffées par un exercice énergique.

« En admettant que l'air sorte à la température moyenne de 17 degrés, sous la pression de 1^{kil},033 par centimètre carré, son poids serait d'environ 1^{kil},222 au mètre cube.

« Le maximum d'air évacué par heure, a été trouvé de 12 711 mètres, ou de $12\ 711 : 3600 = 3^m,53$ en une seconde, à la vitesse de 2^m,17 dans les conduits, et de 3^m,76 environ dans la cheminée. Il en résulte que ce qui représente l'effet utile de la ventilation, n'a été que de

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{3,53 \cdot 1,22}{9,81} \times \overline{3,76^2} = 3^{\text{kil. mét.}}, 13.$$

« Ce résultat montre que, pour des ventilations de ce genre, il serait inutile de re-

courir à l'emploi des ventilateurs mus par des moteurs mécaniques; ce n'est que quand les quantités d'air à évacuer seraient beaucoup plus considérables, qu'il pourrait y avoir quelque avantage à employer ces moyens.

« *Constance de température.* Par l'effet de la circulation de l'air et de l'appel plus considérable par le bas que par le haut, la température a toujours été maintenue, à très-peu près la même, à la partie supérieure que vers le bas. Les variations consignées au tableau n'ont jamais dépassé 1°,5 sur 20 degrés, qui était la température maximum.

« *Pureté de l'air.* On a également remarqué que, malgré la grande affluence du public, composé en grande partie d'ouvriers qui avaient passé leurs journées dans les ateliers, l'air n'a pas paru impur et n'était pas chargé d'une odeur désagréable.

« *Volume d'air évacué par personne.* Le volume d'air enlevé, et par conséquent rentré, par personne, dans les jours des plus nombreuses réunions et des ventilations les plus actives, a été :

Le 14 février, pour 775 personnes, 11638 ^m par heure,	15 ^m ,10 par personne.
Le 18 février, pour 850 personnes, 12711 ^m par heure,	15 ^m ,00 par personne.
Le 27 février, pour 800 personnes, 12550 ^m par heure,	15 ^m ,60 par personne.
Moyenne.....	15 ^m ,23 par personne et par heure.

« Dans les ventilations les moins actives, les volumes d'air ont été les suivants :

Le 7 mars, pour 800 personnes, 7134 ^m par heure,	8 ^m ,9 par personne.
Le 8 mars, pour 800 personnes, 7384 ^m par heure,	9 ^m ,2 par personne.
Le 12 mars, pour 800 personnes, 9556 ^m par heure,	11 ^m ,0 par personne.
Moyenne.....	10 ^m ,0 par personne.

« Quoique dans ce dernier cas l'air n'ait pas paru vicié et qu'on n'ait remarqué aucune odeur, je pense que la plus grande proportion obtenue, celle de 15 à 16 mètres cubes par personne et par heure, doit être adoptée comme base des projets de ventilation. On pourrait même l'augmenter, je crois, pourvu que les orifices d'appel fussent assez multipliés pour que la vitesse du courant d'air produit par chacun d'eux fût à peu près insensible pour le public.

« Il ne faut pas oublier que cette donnée n'est relative qu'aux amphithéâtres ou lieux occupés par des personnes en bonne santé, et non par des malades et surtout par des blessés.

« J'ai constaté antérieurement, par des expériences spéciales, qu'à l'hôpital Beaujon la quantité d'air évacué variait de 40 à 60 mètres cubes par malade et par heure, et qu'elle était à peine suffisante quand il n'y avait pas de blessures trop graves.

« *Volume d'air évacué par mètre carré de section de passage.* Le tableau précédent, donnant les aires totales des sections transversales des passages et les vitesses moyennes de l'air, il est facile d'en déduire le volume d'air évacué par mètre carré de section des conduits, ce qui est un élément important à connaître pour l'établissement des ventilateurs; en réunissant les résultats, on obtient les chiffres suivants :

DATES.	Volume total évacué par heure.	Valeur évaluée par mètre carré de section.	VITESSES MOYENNES	
			dans les conduits horizontaux.	dans la cheminée.
18 février.....	42711 ^m ,116	7700	2 ^m ,17	3 ^m ,81
27 février.....	42550 ^m ,460	7600	2 ^m ,12	3 ^m ,72
1 ^{er} mars.....	41976 ^m ,784	7250	2 ^m ,02	3 ^m ,54
FAIBLES ÉVALUATIONS.				
7 mars.....	7133 ^m ,94	5500	1 ^m ,47	2 ^m ,58
8 mars.....	7384 ^m ,39	5460	1 ^m ,52	2 ^m ,67
12 mars.....	9556 ^m ,39	7100	1 ^m ,98	3 ^m ,45

« On doit ajouter que le foyer d'appel employé n'a généralement été entretenu qu'assez faiblement, et que l'échauffement de la cheminée par le simple tuyau de chauffage et celui des conduits horizontaux par les bouteilles pleines d'eau chaude, ont paru suffisants.

« Il est à regretter que les quantités de charbon brûlé dans le foyer n'aient pas été mesurées séparément. La quantité totale de charbon consommé par le chauffage et la ventilation, a varié par jour de 180 à 225 kilogrammes; soit 200 kilogrammes par jour.

« *Conclusions.* En résumé, on voit que le dispositif adopté au Conservatoire des Arts et Métiers pour la ventilation du grand amphithéâtre, qui contient quelquefois huit à neuf cents auditeurs, a donné les résultats suivants :

1° La température a été maintenue à très-peu près la même dans toutes les parties de l'amphithéâtre ;

2° L'air n'y a paru vicié et souillé de mauvaise odeur dans aucun cas ;

3° Le volume d'air évacué par auditeur et par heure, s'est élevé à 15^m,23 dans les plus grandes évacuations, et à 10 mètres cubes dans les plus faibles.

« Ces résultats, qui assurent la salubrité de l'amphithéâtre malgré la présence d'un si grand concours d'auditeurs et la combustion de quarante-huit lampes de Carcel, montrent donc que l'appareil de M. Léon Duvoyer-Leblanc satisfait à la fois aux conditions d'un bon chauffage et d'une abondante ventilation. »

Observations sur l'anémomètre de M. Morin. M. Morin dans son mémoire ne parle que de ce qu'il a fait, parce qu'il a supposé que les personnes auxquelles il s'adressait étaient parfaitement au courant de ce qui existait. Mais ici, je regarde comme un devoir de rappeler où en était la question des anémomètres quand M. Morin s'en est occupé.

M. Combes est certainement le premier qui se soit occupé sérieusement des anémomètres, et de leur graduation. L'anémomètre de M. Combes publié en 1838, très-bien exécuté par M. Newmann, a rendu de grands services, et se trouve maintenant dans les

mains de tous les ingénieurs qui s'occupent de chauffage et de ventilation. Je l'ai décrit en détail dans le premier volume du traité de la chaleur. L'anémomètre de M. Morin est disposé de la même manière que celui de M. Combes, seulement il renferme trois roues au lieu de deux, et les aiguilles sont à godets, modifications qui ont des avantages et des inconvénients dont je parlerai plus tard. Le mode d'expériences employé par M. Morin pour déterminer la formule, au moyen de laquelle on peut déduire la vitesse d'écoulement de l'air du nombre de tours de la roue à ailettes, est exactement celui qui a été employé par M. Combes. La formule $V=a+bN$ à laquelle M. Morin est conduit, est aussi celle de M. Combes, formule qui depuis quinze ans a été vérifiée par M. Neumann par un très-grand nombre d'expériences.

Ainsi, les expériences exécutées sous la direction de M. Morin sont une nouvelle confirmation d'une formule connue et parfaitement bien établie. Mais dans les anciennes expériences, les vitesses n'avaient jamais dépassé 2 à 3 mètres par seconde, et dans les nouvelles, elles ont atteint 40 mètres, par conséquent la formule de M. Combes se trouve vérifiée pour les plus grandes vitesses, ce qui est un fait important.

L'anémomètre de M. Morin, fort bien exécuté par M. Bianchi, est un instrument d'un usage très commode. Au moyen des aiguilles à godets, les cadrans portent des traces du commencement et de la fin des expériences, et la détermination du nombre de tours effectués se fait plus facilement que dans l'anémomètre de M. Combes. On peut commencer l'expérience lorsque la roue à ailettes a déjà la vitesse de rotation qui correspond à la vitesse du courant d'air. L'expérience peut se prolonger beaucoup plus longtemps qu'avec l'anémomètre de M. Combes, car l'anémomètre de M. Morin peut faire $100.100.50 = 500\ 000$ tours sans que la dernière aiguille revienne au point de départ, tandis que celui de M. Combes n'en peut faire que $100.50 = 5\ 000$. Enfin l'anémomètre de M. Morin peut, en changeant les roues à ailettes, servir à mesurer des courants d'une très-grande vitesse.

Voici maintenant les inconvénients de cet instrument, et une appréciation, que je crois juste, des avantages que je viens de signaler.

L'instrument de M. Morin ne peut servir que pour des vitesses qui dépassent $0^m,50$, tandis que ceux de M. Combes peuvent mesurer une vitesse de $0,12$, et même de $0^m,08$; et c'est un très-grand inconvénient, car souvent dans les grands appareils de chauffage, les vitesses sont inférieures à $0^m,50$. C'est, par exemple, ce qui arrive à la prison Mazas; la section du tuyau dans lequel on a mesuré l'écoulement de l'air de chaque cellule était de $0^m,018$; le volume d'air qui sort de chaque cellule étant de 20 mètres cubes, la vitesse de l'air dans le tuyau était de $0^m,31$. Ainsi, l'instrument de M. Morin n'aurait pas pu servir pour vérifier la ventilation de cette prison. On n'aurait pas pu l'employer non plus pour l'amphithéâtre du Conservatoire, si on avait voulu reconnaître la distribution de la ventilation dans les différents points de la salle.

L'avantage de ne commencer les observations, que quand la roue à ailettes possède déjà la vitesse de rotation correspondante à la vitesse du courant d'air, paraît réel au premier abord, car dans la disposition de l'instrument de M. Combes, le nombre des tours de la roue à ailettes est trop petit, attendu qu'on compte le temps à partir d'un

instant où la roue était en repos, et qu'il faut un certain temps pour qu'elle prenne la vitesse de rotation qui correspond à la vitesse de l'air qui la met en mouvement; mais ce temps est très-court, à en juger par la rapidité avec laquelle les roues à ailettes se mettent en mouvement, même avec de petites vitesses de translation; d'ailleurs les constantes de la formule de l'appareil de M. Combes ayant été déterminées dans les mêmes circonstances, l'erreur, si elle était sensible en réalité, n'existerait pas dans l'usage de ces appareils, à moins qu'il n'y eût une grande différence dans la durée des expériences et de celles qui ont servi à déterminer les constantes. D'après les expériences faites au Conservatoire, les anémomètres de M. Combes indiqueraient une vitesse plus petite d'environ $\frac{1}{6}$ que ceux de M. Morin; mais comme je le ferai voir, ces expériences ont été faites dans des circonstances telles qu'on ne peut rien en conclure.

Il n'en est pas de même de la longue durée qu'on peut donner aux observations, car on obtient ainsi une valeur moyenne plus exacte, quand le courant éprouve de grandes perturbations. Je ferai remarquer, à cette occasion, que quand les canaux traversés par le courant d'air ont une grande section, et que le mouvement n'est pas déterminé par l'appel dans le cendrier d'un foyer, il y a en général assez d'uniformité dans la vitesse de chaque veine d'air; mais souvent la vitesse est très-variable dans les différents points de la section; alors il vaut mieux transporter l'instrument successivement à des intervalles égaux dans différents points de la section, que de le laisser à la même place pendant le même temps, et de répéter l'expérience successivement pour chaque point. Mais le même degré de précision pourrait être obtenu avec l'anémomètre de M. Combes, en répétant suffisamment les expériences.

Enfin, la propriété de l'instrument de M. Morin de permettre, avec certains changements, de mesurer de grandes vitesses, ne pourrait être utile que dans des circonstances exceptionnelles, car jamais dans les appareils de ventilation, les vitesses de l'air ne dépassent 3 mètres par seconde. On en comprend facilement la raison; ce serait une grande faute de la part d'un constructeur d'appareils de ventilation, de rejeter l'air avec une grande vitesse, car il y aurait une grande perte de chaleur si la ventilation avait lieu par une cheminée, ou une grande perte de travail si elle était produite par une machine. Ce qui est important, dans les anémomètres destinés à mesurer les effets de la ventilation, c'est une grande sensibilité qui permette de mesurer les petites vitesses de l'air sur les différents points de l'espace où la ventilation se produit.

En résumé, à mon avis, l'appareil de M. Morin est excellent lorsque les vitesses de l'air dépassent 0,50 par seconde; mais il ne dispense pas d'un anémomètre plus sensible pour les petites vitesses. L'anémomètre de M. Combes est d'un usage moins commode, mais il suffit à tous les cas qui se présentent ordinairement dans les grands appareils de ventilation, et il peut donner des résultats aussi exacts en multipliant les expériences.

Mais il est important de remarquer que tous les anémomètres à mouvement ont de graves inconvénients. Quand ils sont placés dans des orifices qui ne sont pas très-grands, relativement à l'espace parcouru par les ailettes, ils diminuent la section d'écoulement et changent la nature du mouvement; alors ils ne peuvent servir qu'autant qu'ils ont été gradués ou tarés, pour me servir de l'expression de M. Morin, dans les circonstances où

ils doivent être employés; c'est ce que la commission chargée de l'examen des appareils de chauffage de la prison Mazas, a été obligée de faire pour mesurer la vitesse d'écoulement de l'air dans les tuyaux de descente. En outre, ces instruments sont d'un prix élevé, surtout ceux de M. Morin, d'autant plus que chacun doit être accompagné d'un compteur; et cette circonstance est grave pour des instruments dont il serait très-important de voir étendre l'usage. Il serait bien à désirer que l'on s'occupât des anémomètres à pression, surtout de ceux qui devraient rester en permanence dans les cheminées d'appel, pour indiquer à chaque instant l'état de la ventilation. Ces instruments sont d'une nécessité absolue; ils serviraient de guide aux chauffeurs pour maintenir la ventilation au point convenable, et de contrôle permanent à l'administration; en un mot, ils seraient pour la ventilation, ce que sont les thermomètres pour la température. Je reviendrai sur ce point à la fin de ce chapitre.

Observations sur les résultats des expériences. La première remarque que nous ferons sur les résultats des expériences est relative aux variations des effets de la cheminée d'appel. En consultant le tableau, page 47, on trouve que pour les orifices inférieurs 1, 2, 3, 4, les maximums de vitesse, dans les 8 séries d'expériences, ont été proportionnels aux nombres 23, 25, 23, 25, et les minimums aux nombres 11, 12, 13, 12; ainsi pour ces orifices, les vitesses ont varié dans le rapport de 2 à 1. Pour l'orifice qui débouche dans la cheminée à la partie supérieure de la salle, les variations ont été plus petites et seulement dans le rapport de 4 à 3. Les variations des orifices inférieurs ne peuvent pas résulter d'une variation de température de l'air dans la cheminée, car pour des excès de température de 50 degrés et de 200 degrés, le tirage d'une cheminée augmente seulement dans le rapport des nombres 6 et 8. Ces variations proviennent très-probablement de ce que les orifices d'en bas débouchent dans la cheminée au-dessous de la grille, car le foyer étant plus ou moins chargé de combustible, la surface de dégagement de l'air à travers le combustible change constamment et pourrait être diminuée dans une proportion très-considérable. Quoi qu'il en soit, il résulte des expériences, que celles qui ont été faites successivement, même à de courts intervalles, ne sont pas comparables.

D'après cela, on ne peut rien conclure des expériences faites, le 18 février, successivement avec l'anémomètre de M. Morin et celui de M. Combes; d'autant plus que les rapports des volumes d'air écoulés, déterminés par le premier et le second instrument, sont assez différents pour les 5 orifices, car ces rapports sont représentés par les nombres 1,03; 1,23; 1,18; 1,28; 1,19. J'ai déjà fait remarquer que les expériences faites avec l'anémomètre de M. Combes ne sont point entachées d'une erreur en moins, à cause du temps nécessaire pour imprimer à l'instrument, qui part du repos, une vitesse régulière, parce que les constantes de la formule ont été déterminées dans les mêmes conditions. Quant à la sensibilité relative des deux instruments, elle ne peut pas résulter d'expériences comparatives; s'il s'agit de la plus petite vitesse que l'instrument puisse mesurer, la sensibilité est évidemment représentée par le terme constant de la formule; si on veut parler du nombre de tours qui correspond à un même accroissement de vitesse, la sensibilité est représentée par le coefficient du second terme de la formule.

M. Morin a cherché, en comparant les résultats obtenus, s'il y avait une influence du

nombre des auditeurs sur la ventilation. Il a trouvé qu'elle augmentait avec leur nombre, ce qui devait être, toutes les autres circonstances étant les mêmes. Mais M. Morin pense, « que l'influence du nombre des auditeurs n'est pas assez grande pour qu'il soit indispensable d'en tenir compte dans l'établissement des appareils, excepté pour les réunions nombreuses de personnes échauffées par un exercice énergique. » Il m'est impossible de partager cette opinion; chaque individu, par l'acte même de la respiration, dégage au moins 40 unités de chaleur par heure, employées à chauffer l'air, et cette chaleur ne peut pas disparaître. Si, dans les expériences rapportées dans le Mémoire, on avait mesuré la température de l'air à la sortie des bouches du calorifère, on aurait pu apprécier l'influence du nombre des auditeurs sur la température de l'air à l'entrée des orifices d'aspiration. Il est d'ailleurs facile de prouver par un calcul bien simple, qu'en supposant une ventilation de 10 mètres cubes d'air par personne et par heure, les 40 unités de chaleur émises par chaque individu, indépendamment de la chaleur employée à la vaporisation de l'eau provenant de la transpiration, élèveraient l'air de ventilation d'environ 12 degrés.

On trouve ensuite dans le Mémoire un calcul très-simple et très-exact pour obtenir le travail utile de la cheminée, qui est seulement de $3^{\text{km}},13$; c'est un chiffre très-petit. Mais il faut remarquer que le travail réel de la cheminée se compose, non-seulement du travail utile, mais encore de celui qui correspond aux résistances de toute espèce qu'éprouve l'air depuis l'orifice extérieur d'accès jusqu'au sommet de la cheminée. Ces pertes ne peuvent pas être calculées exactement; mais si on avait donné la hauteur de la cheminée et la température moyenne de l'air qu'elle écoulait, on aurait pu calculer la vitesse que l'air aurait eue en faisant abstraction des frottements, le carré du rapport de la vitesse observée à la vitesse théorique aurait représenté exactement le rapport du travail réel de la cheminée à sa puissance. Faute de ces renseignements, il faut s'en tenir à l'analogie; or pour les appareils de même genre ce rapport est à peu près de 0,25; ainsi la machine qui remplacerait la cheminée devrait produire un travail au moins égal à $3^{\text{km}},13 \times 4$. Mais le travail effectif de cette machine ne serait qu'une certaine fraction de celui qui serait consommé pour la faire mouvoir; si, par exemple, c'était un ventilateur à force centrifuge, le travail utile n'étant guère que 0,33 du travail consommé, pour remplacer la cheminée par un ventilateur, il faudrait dépenser par seconde

$$3,14 \times 4 \times 3 = 37^{\text{km}},68$$

qui correspondent à un demi-cheval vapeur. Quant aux avantages et aux inconvénients que présente la ventilation par la chaleur et par une action mécanique, c'est un point sur lequel je reviendrai à la fin de ce chapitre.

J'arrive maintenant à l'appréciation des résultats des expériences.

Le maximum de ventilation, lorsque tous les orifices d'appel étaient ouverts, a été de 12 711 mètres cubes le 18 février, et le minimum de 9556, le 12 mars, et la salle peut contenir 900 personnes; en supposant que ces volumes d'air aient été employés d'une manière efficace à l'assainissement et que la ventilation eût été uniformément répartie, le volume d'air pour chaque personne eût été de 14 et de 10,5 mètres cubes; volumes qui dépassent certainement de beaucoup celui qui est rigoureusement nécessaire à l'assainisse-

ment. Je ferai remarquer, à cette occasion, que dans les tableaux des expériences, pour obtenir la ventilation par personne, on a divisé la ventilation totale par le nombre des personnes présentes; mais c'est par le nombre des places qu'il faut faire la division, parce que si l'appareil est disposé convenablement, la ventilation dans chaque place sera toujours la même, qu'elle soit ou non occupée; d'ailleurs, quelle que soit la distribution de la ventilation, il est évident que le volume d'air qui traverse la salle ne peut pas se répartir également entre toutes les personnes présentes, quel qu'en soit le nombre.

Mais cela ne suffit pas pour apprécier l'appareil, il faut évidemment qu'on soit assuré que la ventilation constatée quand on a fait les expériences existera toujours. Quand la ventilation a lieu par un foyer, qui à lui seul chauffe l'air à son entrée dans la cheminée d'appel, par une consommation uniforme de combustible en hiver, et également uniforme pendant l'été, ce qu'il est facile d'établir, on obtient une ventilation qui ne varie que dans des limites très-restreintes. Mais ici, comme le chauffage de l'air a lieu, par deux tuyaux de cheminée en fonte qui sont placés dans la cheminée d'appel et dont la température est variable, par des tuyaux à eau chaude qui probablement sont alimentés par le calorifère et dont la température n'est pas constamment la même, enfin par un foyer placé dans la cheminée, il me paraît impossible que la ventilation puisse être réglée autrement que par un anémomètre à pression placé dans la cheminée, garni d'une aiguille qui indiquerait à chaque instant l'état de la ventilation, et qui aurait été gradué d'après des expériences faites avec un anémomètre à mouvements de rotation. Or, dans le Mémoire de M. Morin il n'est pas question d'un pareil instrument, et il est peu probable que le chauffeur ait un moyen quelconque pour régler la ventilation, puisque dans les expériences elle a varié dans le rapport de 4 à 3.

Mais il ne suffit pas qu'un certain volume d'air entre et sorte d'une pièce pendant un certain temps, pour qu'elle soit assainie, il faut évidemment que cet air soit utile à l'assainissement, et pour cela il est indispensable qu'il traverse l'espace occupé. Il faut en outre, que le renouvellement de l'air soit à peu près le même dans tous les points de cet espace. Or, dans le cas dont il s'agit, cette dernière condition n'est pas nécessairement satisfaite, car l'action d'un orifice d'appel, sur une certaine étendue, diminue très-rapidement à mesure que cette étendue s'éloigne de l'orifice. Par conséquent les dispositions des orifices d'accès de l'air dans la pièce et celles des orifices d'appel pourraient être telles, que dans certains points la ventilation fût insuffisante, tandis que dans d'autres elle serait en grand excès. Alors, quoique la pièce fût traversée par un très-grand volume d'air, une partie plus ou moins considérable pourrait être fort insalubre.

Enfin une dernière condition, aussi essentielle, surtout pour l'assainissement d'une pièce contenant un si grand nombre de personnes si rapprochées, c'est que chacune d'elles reçoive de l'air pur; et non de l'air échauffé et déjà vicié par la respiration.

Les questions que je viens d'indiquer, savoir, la régularité et le contrôle de la ventilation totale, l'uniformité de la ventilation dans les différents points de la salle et l'état de l'air qu'on y respire, sont évidemment tout aussi importantes que le volume total de la ventilation, mais elles n'ont point été examinées. Il est très-fâcheux que M. Morin se soit contenté de mesurer les volumes d'air appelés par la cheminée; car s'il eût examiné les choses

de plus près, il en serait certainement résulté des documents précieux pour la question si importante et si compliquée du chauffage et de l'assainissement des grandes salles de réunion.

Il est également bien regrettable que le mémoire ne contienne aucun renseignement utile à la science du chauffage et de la ventilation; on n'y trouve ni la hauteur de la cheminée d'appel, ni la température de l'air qu'elle renfermait pendant les expériences, ni les quantités de combustible qui ont été consommées dans le foyer d'appel, ni les surfaces des orifices d'accès de l'air dans la pièce, ni la température de cet air; on ne dit pas même comment il est échauffé. On ne trouve dans le mémoire que les renseignements rigoureusement indispensables pour calculer les résultats des expériences anémométriques sur la ventilation totale.

Les expériences exécutées d'après les ordres de M. Morin ont certainement été faites avec beaucoup de soin et avec d'excellents instruments, et je les considère comme parfaitement exactes; mais d'après ce que je viens de dire, on ne peut en déduire que les faits mêmes qu'elles constatent, c'est-à-dire que tels jours, à telles heures, il est entré tels nombres de mètres cubes d'air dans la cheminée d'appel, mais rien de plus.

L'incertitude que le mémoire laisse subsister sur la régularité de la ventilation totale, sur l'uniformité de sa répartition dans la salle, et sur l'état de l'air qu'on y respire dans différents points, fait facilement comprendre que l'opinion de M. Morin sur l'efficacité de l'appareil ne soit pas partagée par tout le monde. Un article de la *Revue de l'instruction publique* du 13 mai dernier, relatif à la question qui nous occupe, se termine ainsi : « Nous ajouterons que nous avons constaté nous-mêmes une lourdeur accablante de l'atmosphère à quelques-unes des leçons faites dans cette salle : ce jour-là on n'expérimentait pas l'appareil. » BINET SAINTE-PREUVE.

§ 6. CHAUFFAGE ET VENTILATION DE LA SALLE DES SÉANCES DE L'INSTITUT.

Une description très-succincte de l'appareil de ventilation de cette salle, a été lue par M. Cheronnet, ingénieur civil, à la séance de l'Institut du 6 mai 1852. Cette note a été publiée dans la *Revue de l'Instruction publique*. Nous la reproduisons ici textuellement :

« La salle des séances de l'Institut est chauffée et ventilée d'après les procédés de M. Duvoir-Leblanc. Le chauffage est produit par quatre poêles remplis d'eau chaude, à travers lesquels circule un courant d'air qui s'échauffe. Ces appareils, situés aux quatre coins de la salle, pourront fonctionner ensemble ou séparément, suivant la température de l'air extérieur, au moyen de robinets de communication spéciale entre chacun d'eux et le générateur.

« La ventilation se fait par deux grands conduits qui communiquent, l'un avec une série de grilles situées devant les pieds même des membres de l'Institut, l'autre avec un

grand nombre de trous faits dans les gradins qui règnent sur les longs côtés de la salle. Le premier de ces deux tuyaux descend jusqu'au rez-de-chaussée, pour remonter ensuite dans une cheminée, dans laquelle est un réservoir à eau chaude de 12 mètres de hauteur qui produit l'appel. Le second tuyau ne descend que jusqu'à l'entresol, et remonte ensuite dans la même cheminée. Un troisième conduit, destiné à la ventilation d'été, part de la partie supérieure de la salle et se rend dans la même cheminée.

« Le 5 avril, une expérience a été faite dans le but de constater la quantité d'air extraite de la salle des séances : cette expérience a été exécutée au moyen de deux anémomètres qui ont été placés simultanément dans les deux conduits, et y sont restés une heure chacun. Voici les résultats de cette expérience :

« 1^{er} orifice (rez-de-chaussée), section 0^m,970 ; vitesse de l'air 0^m,938 par seconde ; volume écoulé en une heure 3275^m,496. 2^{me} orifice, section 0^m,3842 ; vitesse 1^m,284 ; volume écoulé en une heure 1795^m,916. Volume total écoulé en une heure 5071^m,412. Ainsi, pendant cette première expérience, il a été extrait de la salle des séances 5071 mètres cubes d'air. La salle renfermait 180 personnes, ce qui donne, par heure et par personne, 28^m,20. Le temps était très-beau, et la température était de 12 à 13°.

« Le 19 avril, une seconde expérience a été faite dans les mêmes conditions ; elle a donné, pour le premier conduit, 4022^m,784 ; pour le second, 1908^m,372 ; total, 5931. Il y avait 200 personnes dans la salle ; le volume d'air extrait a donc été de 29^m,65 par heure et par personne. Ce jour-là le temps était très-couvert ; il est même tombé de la neige pendant l'expérience ; la température extérieure s'est élevée à 7°,5 environ. »

Observations. [La note de M. Chéronnet n'étant relative qu'à la ventilation totale, nous aurions à faire ici les mêmes remarques que pour l'appareil de ventilation de l'amphithéâtre du Conservatoire, nous ne les répéterons pas.

§ 7. CHAUFFAGE ET ASSAINISSEMENT DE L'HOPITAL DU NORD.

Quoique les constructions relatives au chauffage et à l'assainissement de ce grand établissement soient à peine commencées, comme il y a eu concours, décision d'un jury composé des personnes les plus compétentes, et approbation de la décision du jury par le conseil de surveillance de l'assistance publique et par le conseil municipal, et, qu'en outre, le projet qui a été préféré renferme des dispositions nouvelles d'un grand intérêt, j'ai pensé qu'il serait utile de réunir ici les principaux documents relatifs à cette grande affaire.

L'hôpital se compose d'une cour carrée de 115 mètres environ de longueur sur 45 de largeur, environnée de portiques. Perpendiculairement aux longs côtés, à égales distances les uns des autres et aux extrémités, se trouvent six pavillons isolés, à deux étages, sans y comprendre le rez-de-chaussée ; à chaque étage de chacun de ces bâti-

ments se trouve une grande salle renfermant 32 lits, et une plus petite qui n'en contient que 2; ainsi le nombre des lits de chaque pavillon est de 102, et le nombre total de 612. Dans la direction des petits côtés de la cour intérieure, se trouvent des bâtiments qui se prolongent jusqu'à la distance des extrémités des pavillons; enfin, derrière un des petits côtés de la cour intérieure, et dans l'alignement des grands côtés, se trouvent encore d'autres constructions; ces bâtiments sont destinés aux différents services de l'établissement. Tous sont environnés par un mur d'enceinte.

Le jury chargé d'examiner les projets était composé ainsi qu'il suit : M. Regnault, président, M. Pelouze, membres de l'Institut; M. Hachette, membre du conseil de surveillance; M. Blondel, M. Battel, administrateurs des hospices; M. Robinet; M. Gauthier, directeur de l'hôpital; M. Thauvin, ingénieur civil, membre-adjoint.

Quatre projets avaient été présentés, l'un par M. Duvoir-Leblanc, un autre par M. René Duvoir, un troisième par M. Grouvelle, et enfin le dernier par MM. Thomas et Laurens. Mais MM. Thomas et Laurens, et M. Grouvelle, s'étant réunis pour présenter un projet en commun, le nombre des projets s'est trouvé réduit à trois; celui de M. René Duvoir ayant été regardé comme inférieur aux deux autres, je ne parlerai que de ces derniers.

Je ne connais point les détails du projet de M. Duvoir-Leblanc; mais, d'après des renseignements certains qui m'ont été donnés, voici les dispositions principales de ce projet. Dans la cave de chaque pavillon se trouve un calorifère à eau chaude, dont l'eau alimente un certain nombre de poêles placés dans les salles du rez-de-chaussée, du premier et du deuxième étage; l'air pris au niveau du sol s'échauffe en passant autour des tuyaux de communication de l'eau chaude et à travers les poêles, sort dans les salles, et s'échappe ensuite par des conduits verticaux qui le conduisent dans le grenier; là, il est dirigé par des canaux horizontaux, renfermant des tuyaux à eau chaude, dans une cheminée ayant 5 mètres de hauteur.

Le projet de MM. Thomas, Laurens, et Grouvelle, repose sur ces deux principes bien constatés : 1° la transmission de la chaleur par la vapeur peut s'effectuer, même à une très-grande distance, avec une très-faible perte de chaleur. C'est la conséquence de la grande vitesse que prend la vapeur sous un faible excès de pression, qui permet de donner aux tuyaux de conduite de petites sections; tuyaux qui, étant placés dans des caniveaux convenablement disposés, peuvent être environnés de matières qui conduisent mal la chaleur; 2° dans une machine à détente sans condensation, la vapeur détendue renferme presque autant de chaleur qu'en entrant dans le cylindre. Ce dernier principe résulte de ce que la chaleur latente de la vapeur est sensiblement indépendante de sa pression.

Voici maintenant la disposition générale de l'appareil. Une chaudière à vapeur est placée dans une cave située dans une des cours de service, qui était destinée à la chaudière à vapeur des bains; une haute cheminée en briques, placée à côté, opère le tirage du foyer. La vapeur, formée sous une pression de 4 à 5 atmosphères, détendue dans une machine de manière à conserver une pression de 1 atmosphère et demie, est conduite en face de chaque pavillon, par un tuyau en fonte placé au centre d'un caniveau, creusé dans les galeries souterraines qui font le tour de la cour intérieure de l'hôpital; ce tuyau

est enveloppé de corps mauvais conducteurs qui réduisent à fort peu de chose la chaleur perdue. Il passe dans son trajet à côté des bains, et fournit, par un court branchement, la vapeur qu'ils exigent. Un petit tuyau branché sur la conduite générale, en face de chaque pavillon, y conduit la vapeur nécessaire au chauffage; les corridors et les chambres des sœurs sont chauffés par des bouches de chaleur, qui reçoivent l'air chauffé par les colonnes montantes de vapeur et de retour d'eau; la cage de l'escalier, le chauffoir et les salles de malades, renferment des 'poêles' à eau chauffés par la vapeur. Les tuyaux de conduite de vapeur dans les salles, sont placés dans un caniveau situé au-dessous du parquet, et recouvert d'une plaque de fonte. Les étuves des offices sont entretenues chaudes, par la circulation d'un petit filet de vapeur dans le bain-marie, dont elles se composent. L'eau pour les bains, est chauffée dans un réservoir en tôle placé au grenier, à l'aide d'un serpentín dans lequel circule la vapeur.

La machine à vapeur, dans laquelle se détend la vapeur qui est ensuite employée en chauffage, fait mouvoir un ventilateur qui aspire de l'air recueilli au sommet du clocher de la chapelle et le refoule dans des tuyaux en tôle, qui le portent à chacun des pavillons et à chacun des chauffoirs. Dans l'épaisseur du mur de tête de chaque pavillon, existe une cheminée qui reçoit l'air insufflé et permet de le distribuer aux divers étages. Sous le plancher de chaque salle, et contre le caniveau qui contient les tuyaux à vapeur et de retour d'eau, se trouve une galerie en maçonnerie partant de la cheminée; l'air forcé circule dans cette galerie, d'où, par un certain nombre d'orifices ménagés à sa paroi, il se répand autour des tuyaux à vapeur et y prend une température de 20 à 30°; alors il entre dans la salle par des ouvertures ménagées dans la plaque de fonte qui recouvre le caniveau. Les sections de ces ouvertures sont telles, que l'air qui en sort ne possède qu'une faible vitesse.

Des cheminées aboutissant au grenier, au nombre de neuf, et creusées dans chaque mur latéral des salles, sont destinées à évacuer l'air vicié; chacune d'elles porte à cet effet deux orifices d'entrée munis de registres; l'un, placé au niveau du sol, sert pour l'hiver; l'autre à 2^m,50, n'est ouvert que l'été. Les cheminées d'évacuation débouchent dans les greniers, et l'air vicié qu'elles amènent se dégage par quatre châssis à tabatières et par une cheminée centrale en tôle, placée au milieu du grenier. Cette disposition ne permet pas d'utiliser les greniers; mais si on voulait s'en servir, il faudrait conduire l'air des cheminées partielles à la cheminée centrale par des canaux.

L'état hygrométrique de l'air dans la salle est maintenu à $\frac{1}{2}$, par une injection de vapeur dans les tuyaux de conduite.

La quantité d'air insufflé peut varier de 20 à 40 mètres cubes par lit et par heure.

L'air sort du ventilateur avec un excès de pression de 0^m,04 d'eau.

Il y a une chaudière, une machine à vapeur, et un ventilateur de rechange.

La vapeur sortant de la chaudière, ou de la machine où elle a été détendue, suffit à tous les services: chauffage, ventilation, bains, buanderie, élévation de l'eau.

Le jury chargé de l'examen des projets, à la suite du rapport fait par M. Regnault, a donné son approbation au projet de MM. Thomas, Laurens, et Grouvelle, et a placé en seconde ligne, mais à une grande distance, celui de M. Duvoir-Leblanc. Le rap-

port de M. Regnault n'a point été publié ; mais par la comparaison des dispositions des deux projets, il est facile de reconnaître les principaux motifs des conclusions. Pour éviter des redites, je désignerai par A le projet approuvé et par B celui qui a été placé en seconde ligne.

1° A. Un seul foyer pour tous les services : il est placé en dehors des bâtiments, dans une cour de service. La fumée s'écoule par une cheminée très-élevée qui rejette les fumées à une grande distance du sol.

B. Dix foyers répartis dans tous les bâtiments, dont les fumées s'écoulent par des cheminées qui dépassent peu les toits.

2° A. Une seule chaudière à vapeur à haute pression, avec rechange, placée en dehors des bâtiments, de sorte qu'une réparation ou un accident à la chaudière n'interromprait aucun service.

B. Six chaudières à eau chaude à haute pression, sans rechanges, placées dans les caves des pavillons. Une réparation à une chaudière ou un accident suspendrait complètement le chauffage et la ventilation du pavillon.

3° A. Air de ventilation pris à une grande hauteur, où en toute saison il ne peut être vicié.

B. Air de ventilation pris au niveau du sol, où certainement il ne peut pas être aussi pur qu'au sommet du clocher de la chapelle.

4° A. La ventilation peut facilement être augmentée, et de beaucoup, par l'accroissement de la production de vapeur.

B. La ventilation ne peut être augmentée que dans une très-faible proportion avec l'élévation de température de l'air dans la cheminée.

5° A. Le travail mécanique pour produire la ventilation ne coûte rien en hiver, parce que la vapeur détendue est employée au chauffage. Il en est de même dans le reste de l'année, quand la vapeur détendue est employée pour le service des bains, la buanderie, ou pour l'élévation de l'eau.

B. La ventilation par une cheminée coûte la chaleur employée pour chauffer l'air qui s'échappe dans la cheminée, et d'autant plus que la cheminée est plus courte ; et dans tous les cas, la chaleur consommée produit un travail beaucoup plus petit que celui que produirait de la vapeur renfermant la même quantité de chaleur.

Le ministre de l'intérieur a décidé, que la moitié de l'hôpital serait chauffée et ventilée par le système de MM. Thomas, Laurens, et Grouvelle, et l'autre moitié par celui de M. Duvoir-Leblanc.

§ 8. VENTILATION DU DÉPOTOIR DE LA VILETTE.

Pendant des siècles, il a existé sur le versant occidental de la butte Chaumont, un emplacement, connu sous le nom de voirie de Montfaucon, sur lequel étaient transportées

toutes les matières infectes dont le séjour, dans l'intérieur de la ville de Paris, pouvait nuire à la salubrité. Dans ces derniers temps, par suite de la substitution des citernes étanches aux fosses perméables qui recevaient autrefois les matières fécales, la voirie de Montfaucon avait pris un immense développement, et plusieurs hectares de terrain étaient transformés en vastes bassins, remplis du liquide fourni par la vidange des fosses d'aisance.

Ces bassins, et les terrains avoisinants affectés à la dessiccation des matières pâteuses qui étaient extraites des bassins pour être transformées en poudrette, répandaient dans l'atmosphère des gaz infects, qui, portés par les vents à des distances considérables, rendaient très-insalubres certains quartiers de Paris et les communes voisines.

Cet état, devenu intolérable par suite de l'extension de la voirie, avait soulevé de vives réclamations, et depuis bien des années on demandait, avec de vives instances, la suppression d'un établissement si incommode et si insalubre. En 1823 Louis XVIII, voulant favoriser cette mesure de salubrité, avait cédé à la ville de Paris, sur les bords du canal de l'Ourcq, un vaste terrain destiné à remplacer la voirie de Montfaucon; on y fit des travaux d'appropriation, et dans la pensée que le transport pourrait se faire par le canal, on créa, à la petite Villette, un port destiné à l'embarquement des récipients. Cette pensée était naturelle en 1826; mais comme, par suite de la sévérité apportée par la police à la construction des fosses étanches, le volume des matières s'accroissait si rapidement qu'en vingt années il avait plus que quadruplé, (en 1848 il était de 210 000 mètres cubes,) on avait successivement reculé devant le transport par bateaux et par les chemins de fer. On ne savait quel parti prendre, quand M. Mary, ingénieur en chef des ponts et chaussées, chargé du service municipal, proposa de créer à la Villette, un établissement clos, dans lequel entreraient les voitures de vidange, où les matières, renfermées dans des tonnes de 2 mètres cubes de capacité, seraient versées dans de vastes fosses, et d'où elles seraient envoyées à Bondy, au moyen de pompes qui les refouleraient dans un tuyau de conduite souterrain.

Cet établissement créé de 1845 à 1848, et connu sous le nom de dépotoir, a été mis en activité au printemps de cette dernière année et n'a pas cessé de fonctionner depuis cette époque. Deux conduites de 0^m,27 de diamètre, en tôle revêtue de bitume intérieurement et extérieurement, établissent une communication souterraine entre le dépotoir et les bassins de la voirie de Bondy. Deux systèmes de pompes, destinées à se suppléer, mues par une machine à vapeur, permettent de refouler en quelques heures, jusqu'à Bondy, à 10 kilomètres de distance, les matières liquides versées dans les fosses du dépotoir. Là, ces matières sont employées à la fabrication des engrais et des sels ammoniacaux.

Les bâtiments du dépotoir se composent de neuf hangars couverts, adossés, dans chacun desquels peuvent entrer trois voitures; au-dessous de chacun se trouvent trois fosses égales, garnies d'un large orifice à la partie supérieure; les trois fosses d'une même rangée communiquent entre elles par de larges orifices percés à la partie inférieure, mais placés alternativement à droite et à gauche. Les voitures de vidange que l'on rencontre le soir dans Paris, arrivent à la Villette de minuit à huit heures du matin, s'arrêtent sous les hangars, et les tonneaux sont vidés par un sac de débardage qui laisse couler les ma-

tières dans les fosses sans qu'il en jaillisse rien au dehors. Ces matières se répandent dans les fosses, qui, comme nous l'avons dit, communiquent toutes entre elles, et dans leur trajet laissent déposer les matières solides qu'elles contiennent. Les tuyaux d'aspiration des pompes communiquent avec les trois dernières fosses, qui correspondent au dernier hangar.

Lorsque les fosses ont été épuisées par l'action de la machine, elles doivent être nettoyées des résidus qui s'y sont amassés, et qui présentent une épaisseur de 0^m,10 environ. On facilite le départ en lâchant en haut du radier, un courant d'eau vive qui agite et délaye les matières, et permet d'en tirer encore une partie à la pompe. La dernière couche, composée principalement de gravois, doit être extraite au rabot, mise en baril, et remontée au treuil. C'est le travail des zingueurs, travail sale, pénible, et dangereux. Malgré l'influence salutaire de l'eau vive, qui, rafraîchissant des produits fermentés, arrête le développement des gaz, l'opération restait un écueil pour les ouvriers, qui ne s'y aventuraient qu'avec précaution et en laissant les trappes ouvertes. Plusieurs fois cependant, un dégagement subit de gaz, ou un air infect et chaud amassé dans la fosse, surprit l'ouvrier et l'asphyxia. Ces accidents graves, heureusement, n'étaient pas fréquents, mais l'odeur était souvent détestable, surtout par l'abaissement de la pression atmosphérique. L'eau ne suffisant pas à l'assainissement des fosses, il fallait y introduire un courant d'air énergétique.

La nécessité de la ventilation avait été prévue par M. Mary, et un ventilateur, mû par la machine à vapeur, avait été disposé pour enlever l'air des dernières fosses; le renouvellement de l'air y était très-vif, mais ce mouvement n'existait pas dans toutes les autres. Cet appareil ayant été construit peu de temps avant que M. Mary eût quitté le service de la ville de Paris, cet habile ingénieur n'avait pas eu le temps de perfectionner l'effet de la machine en l'étendant à toutes les fosses.

M. Mille, ingénieur des ponts et chaussées, chargé du service du dépotoir, a obvié à l'inconvénient grave que je viens de signaler, et c'est du rapport de M. Mille que les lignes qui suivent ont été extraites.

« M. Grouvelle eut l'obligeance de m'éclairer de ses conseils et de son expérience; guidé par sa belle étude de la prison Mazas, il indiqua de suite le remède au mal. A l'aspiration unique s'exerçant sans résultat à une extrémité, il fallait substituer des actions locales isolées; il fallait un aérage spécial pour chaque cellule, qui devait recevoir, de la manière la moins contrariée et la plus courte, une part distincte à l'effet du moteur. Si la construction eût été à faire, un foyer central, formant l'appel des lignes maîtresses dirigées sur chaque galerie, aurait offert le système le plus favorable à la régularité, à la puissance de l'aération, et en même temps à l'économie du combustible. Mais le ventilateur et la machine existaient. Il y avait nécessité de se raccorder aux dispositions anciennes, et de ne prendre de la solution théorique, que ce qu'il y avait d'applicable aux appareils ou aux constructions qu'on ne pouvait plus changer.

« On se décida à ouvrir dans les reins des voûtes trois conduits de 0^m,39, sur lesquels se branchent des conduits secondaires de 0^m,31, lesquels se terminent par des bouches de 0^m,062, abordant chaque cellule. L'air descend par les trappes

ouvertes, balaye complètement la cellule et s'échappe par les deux bouches qu'il va rencontrer à la paroi de chaque voûte. Les grands conduits aboutissent à la chambre du ventilateur, d'où les gaz sont refoulés dans une cheminée spéciale, adossée à la cheminée de la machine. Des vannes régulatrices à l'orifice de chaque ligne, des tiroirs au-devant de chaque bouche, permettent de répartir le travail du ventilateur, et de l'appliquer aux lignes et aux capacités dont le service veut un assainissement immédiat.

« Ces dispositions ont complètement réussi ; et quoique les citernes reçoivent tout ce qu'il y a de plus infect à Paris, tout ce qui sort des hôpitaux, des casernes et des maisons pauvres, le service se fait avec une sécurité parfaite. Au moment où les ouvriers descendent, l'aération est vive et fraîche, comme sur un boulevard. Il n'y a plus de traces d'hydrogène sulfuré ou d'ammoniaque. Les objets d'or ou d'argent qu'on porte avec soi ne subissent pas la moindre altération, les yeux n'éprouvent pas le moindre picotement, enfin la température des citernes ne diffère pas de celle de l'air extérieur.

« La ventilation est si complète que nous n'avons pas hésité à éclairer les citernes par le gaz. Au centre de chaque profil est un bec d'Argant. Un fumivore emporte, vers la bouche d'aéragé, les produits de la combustion. La flamme est vive et blanche. Le gaz a remplacé les chandelles, qui ajoutaient une infection de plus aux miasmes qui s'échappaient autrefois. Chaque cellule va posséder une bouche d'eau, un bec de gaz et deux bouches d'air. Ce système si simple a rendu le dépotoir l'une des usines de la Villette peut-être la moins insalubre. Toutes les plaintes élevées d'abord par les habitations voisines ont disparu. La santé des ouvriers est excellente ; leur moral est relevé par la puissance même des moyens de propreté et de salubrité mis à leur disposition.

« Quelques expériences peuvent expliquer l'énergie de la ventilation.

« En plaçant un anémomètre dans le courant, avant et après le ventilateur, on a trouvé :

« En avant, dans une section de 0^m,30, une vitesse de 8^m,12 ;

« A la sortie, dans une section de 0^m,17, une vitesse de 12^m,39.

« A ces deux nombres correspondent des débits, par seconde 2^m,44 et 2^m,45, chiffres qui prouvent des opérations concordantes. D'après le dernier nombre, le volume d'air extrait par heure du ventilateur est de 8100 mètres.

« Pour faire la répartition et régler les orifices des tiroirs, on a d'abord tout ouvert, et mesuré ce qu'il passait d'air par chaque bouche de 0^m,062. Les vitesses, dans les citernes n° 1, n° 5, n° 9, étaient 1^m,07, 1^m,60, 5^m,21. On voit que l'action du ventilateur croissait rapidement à mesure que la distance des orifices d'appel devenait plus petite. Mais avec la faible vitesse de 1^m,07, la citerne la plus éloignée débitait encore par ses deux bouches, d'une surface totale de 0^m,125, un volume de 0^m,133 par seconde, ou 480 mètres par heure ; et comme le volume de la citerne est d'environ 80 mètres, le renouvellement de ce volume aurait eu lieu 6 fois dans une heure ; mais la citerne d'aval dépensait par seconde 1^m,065, ou par heure près de 2330 mètres, environ 30 fois son volume.

« Pour corriger l'excès d'appel dans la citerne la plus voisine du ventilateur, on y réduisit les bouches à 0^m,05 de surface, et on gradua les ouvertures des tiroirs successifs, en augmentant très-peu les derniers numéros et beaucoup les premiers ; la citerne n° 1,

la plus éloignée, garda seule son orifice total de 0^m,12. Avec cette disposition, on obtint sur ce dernier point une vitesse double aux bouches d'appel, le volume s'éleva par heure à près de 960 mètres. On était ainsi bien près d'avoir égalisé le tirage dans toutes les citernes. Nous n'avons pas poussé plus loin nos épreuves, parce qu'il nous suffisait d'avoir la certitude que l'on pouvait différencier à volonté le tirage sur tous les points; c'était le but du travail, et il nous semblait atteint.

« Ces résultats d'assainissement, dans les conditions les plus défavorables, prouvent, si je ne me trompe, que la question de désinfection est une étude de mécanique bien plus qu'un problème de chimie. Les agents naturels, l'air et l'eau, sont certainement l'aide le plus efficace quand on ne cherche que la salubrité de la ville et de l'habitation. Ce n'est pas à dire que la chimie n'ait rien à faire en pareille matière; elle intervient aussitôt qu'il s'agit de livrer des engrais à l'agriculture, ou des produits ammoniacaux à l'industrie. Mais tant qu'on reste au point de vue de la police administrative, on n'a besoin que des deux plus simples agents de la nature; en mettant l'eau partout, en renouvelant l'air constamment, on doit dominer l'infection, parce que l'on parviendra toujours, soit à l'empêcher de se produire, soit à la noyer dans un courant qui l'emportera. »

§ 9. CHAUFFAGE ET VENTILATION DES ATELIERS DE TAILLERIE ET DE CRISTALLERIE DE BACCARAT.

Je rapporterai textuellement la note qui m'a été remise à ce sujet par MM. Thomas et Laurens, qui ont construit les appareils.

« Frappés des inconvénients de la ventilation par aspiration, et convaincus des avantages qu'offrirait l'insufflation mécanique de l'air dans les salles à ventiler, dès 1845 nous avons appelé, par des démarches, des mémoires et des projets, l'attention du ministre de l'intérieur et celle de l'administration des hospices sur l'application de ce mode de ventilation aux prisons cellulaires et plus spécialement aux hôpitaux.

« Ce n'est qu'en 1851 que nos idées sur ce sujet furent enfin favorablement accueillies par l'administration des hospices de Paris, à la suite du concours ouvert pour la ventilation et le chauffage du grand hôpital construit dans les terrains du clos Saint-Lazare, et qui porte aujourd'hui le nom d'hôpital de Lariboisière.

« Le jury de ce concours, après une discussion approfondie des divers projets qui lui furent présentés par les personnes les plus habituées à ce genre de travaux, donna la préférence à notre projet, le seul basé sur l'emploi des machines pour insuffler l'air de ventilation, en y ajoutant (toutefois, pour le chauffage des salles, les poêles à eau de M. Grouvelle.

« Les travaux de ventilation par insufflation sont enfin en cours d'exécution à l'hôpital Lariboisière.

« Pendant que les administrations publiques hésitaient à adopter le système précité, en présence des objections soulevées par des intérêts privés et par la routine, l'industrie prenait les devants; la compagnie des cristalleries de Baccarat nous chargeait de l'appliquer à la ventilation de ses vastes ateliers de tailleries des cristaux.

« Dans ce magnifique établissement de cristallerie, les ateliers consacrés à la taille des cristaux se composent d'un corps de bâtiment de 150 mètres de longueur, qui, à une de ses extrémités, se prolonge par une aile en retour d'équerre, ayant même hauteur et même largeur que lui, et une longueur de 45 mètres; toutes les dispositions ont donc dû être prises, comme s'il se fût agi d'un seul corps de bâtiment d'environ 200 mètres de longueur. Le rez-de-chaussée et le premier étage sont occupés par deux files de tours à tailler les cristaux, mis en mouvement par deux turbines d'une force collective de 66 chevaux. Ces ateliers contiennent constamment 544 ouvriers.

« Le taillage se faisant à l'eau, les cristaux travaillés se trouvent toujours humides, ainsi que les objets environnants, et les ouvriers ont continuellement les bras mouillés. Il résulte de ce mode de travail, que l'atmosphère des ateliers est constamment saturée de vapeur d'eau, circonstance qui réclame une ventilation active pour soustraire les ouvriers à l'influence funeste d'une très-grande humidité; cette même circonstance exige pour le chauffage une dépense de combustibles bien plus considérable.

« Les travaux de ventilation et de chauffage ont été établis en même temps et combinés ensemble. Le chauffage s'effectue à l'aide de la vapeur à haute pression, quatre atmosphères et cinq au besoin pendant les plus grands froids, et la ventilation à l'aide de deux ventilateurs à force centrifuge. Un des ventilateurs, mis en mouvement par la turbine n° 1, est placé dans le grenier et refoule, dans les salles de travail, de l'air pur puisé à la hauteur des toits; une conduite générale de vent, en planches de sapin bien jointes, est établi sur le plancher du grenier, et des tuyaux, aussi en bois, descendent de distance en distance pour porter l'air neuf aux diverses salles. En hiver, cet air est préalablement échauffé à la température d'au moins 30 degrés, par son passage dans une chambre que traverse un faisceau de 15 tuyaux de vapeur ayant 0^m,135 de diamètre et 2 mètres de longueur.

« Les orifices d'arrivée de l'air neuf sont placés dans l'axe des salles, à 10 mètres environ les uns des autres, et à 1 mètre au-dessus du plancher.

« Les salles n'ayant que 8^m,30 de largeur, l'air se trouve suffisamment bien réparti; d'ailleurs il était difficile, sans de grands frais, de multiplier davantage le nombre de ces orifices.

« L'air vicié s'échappe des salles, sans aucune cheminée d'appel, ni aucun appareil spécial servant pour l'attirer au dehors, simplement par les joints des fenêtres que l'on a eu soin de ménager à cet effet. On ne ressent aucun courant incommode.

« Le second ventilateur est appliqué à la turbine n° 2, et fait le service de l'autre moitié des ateliers, au moyen de dispositions analogues à celles qui viennent d'être décrites.

« Les ventilateurs ont 1^m,20 de diamètre et une largeur de 0^m,28; ils font 300 tours par minute; la pression du vent dans les répartiteurs, qui aboutissent aux ventouses, n'est que de 3 à 4 millimètres d'alcool.

« Le volume de vent insufflé s'élève à environ 12 mètres cubes par ouvrier et par heure ; ce volume qui, par suite de l'insufflation, agit utilement en entier, procure une ventilation suffisante. Un tel résultat, bien certainement, ne serait pas obtenu avec une ventilation ordinaire par aspiration, dont la cheminée d'appel n'accuserait qu'une semblable dépense d'air par individu et par heure.

« Comme nous l'avons dit, le chauffage s'opère par de la vapeur à haute pression, mode le plus économique et que nous croyons le meilleur, au moins pour des ateliers. Il offre sur l'eau chaude cet avantage si important sous le rapport économique, la facilité de varier et même de supprimer presque instantanément, suivant la température extérieure et suivant d'autres circonstances, l'émission de chaleur, et cela dans telle ou telle salle, indépendamment des autres salles. Il offre aussi l'avantage de n'avoir qu'un seul foyer pour un aussi vaste bâtiment, qui en aurait exigé trois ou quatre avec l'eau chaude.

« Ce sont de simples tuyaux de vapeur, en fonte, qui distribuent la chaleur dans les salles ; ces tuyaux circulent sous les établis des ouvriers ; ils enlèvent ainsi l'humidité plus spécialement accumulée sous ces établis, et permettent aux ouvriers d'avoir les pieds toujours bien chauds.

« L'expérience a prouvé qu'avec la ventilation indiquée, il est indispensable, soit d'émettre de la chaleur dans les ateliers, soit, de préférence, d'élever la température de l'air insufflé, à des époques de l'année et à des heures de la journée, pour lesquelles la température extérieure semblerait devoir rendre tout chauffage inutile. On explique facilement ce fait, qui est une cause d'excès de dépense, par l'efficacité de la ventilation, jointe à l'humidité répandue dans les ateliers. Si l'air neuf n'arrivait pas dans les salles à une température d'au moins 22 à 25 degrés, il occasionnerait une sensation désagréable, ou plutôt les salles se refroidissent rapidement : d'où résulte la nécessité de chauffer l'air de ventilation la majeure partie de l'année, si ce n'est toute la journée, au moins le matin. »

§ 40. OBSERVATIONS SUR LES DIFFÉRENTS MODES DE CHAUFFAGE ET DE VENTILATION.

Chauffage. Supposons d'abord qu'il ne s'agisse que de chauffage, c'est-à-dire de maintenir une pièce fermée à une température donnée. Il suffira évidemment de fournir à la pièce une quantité de chaleur égale à celle qui passe à travers les vitres et les murailles, les murailles ayant été préalablement amenées à un régime permanent, par un chauffage plus ou moins prolongé. Si les murailles se mettaient instantanément au régime qui convient à la température extérieure, la quantité de chaleur à fournir varierait à chaque instant ; mais comme elles renferment beaucoup de chaleur, quand elles ont été échauffées, la quantité de chaleur fournie et la température extérieure, pourraient varier dans des limites assez étendues et pendant un temps assez long, suivant la nature et l'épaisseur

des murailles, sans que la température intérieure éprouvât des variations sensibles. Ainsi, pourvu que les appareils qui transmettent la chaleur aient une étendue suffisante, le foyer pourra toujours être dirigé de manière à produire une température sensiblement constante.

La chaleur nécessaire au maintien du régime, peut être produite par le rayonnement, ou par l'air chaud, ou par ces deux modes réunis. Dans nos foyers domestiques elle provient uniquement du rayonnement. Elle résulte presque uniquement du contact de l'air, quand les surfaces chauffées, ou directement, ou par l'eau chaude, ou par la vapeur, sont formées d'un métal poli, et qu'elles sont placées dans l'intérieur des pièces. Cette chaleur ne provient que de l'air chaud, quand les surfaces de chauffe sont entièrement en dehors des pièces. Enfin, elle résulte à peu près également du rayonnement et du contact de l'air, lorsque les surfaces de chauffe, placées dans l'intérieur des pièces, sont formées de fonte ou de tôle non polie.

La chaleur rayonnante, jouissant de la propriété de traverser l'air sans éprouver de pertes sensibles, si une pièce était uniquement chauffée par rayonnement, les rayons iraient se perdre contre les vitres et contre les murailles, une partie de la chaleur reçue par les murailles échaufferait l'air, il s'établirait des courants ascendants contre leurs surfaces et des courants opposés dans l'intérieur. Par ce mode de chauffage, qui est celui de nos habitations particulières, l'air n'atteint jamais une température élevée, d'autant plus qu'il se produit toujours une grande ventilation, et rarement d'air préalablement chauffé par une partie de la chaleur de la fumée du foyer.

Lorsqu'une pièce est chauffée par un courant d'air chaud, cet air gagne la partie supérieure en se refroidissant rapidement; il s'établit des courants descendants le long des murailles qui les échauffent et conservent leur régime; et l'air intérieur peut être maintenu à une température constante.

D'après ce que je viens de dire, il est facile de prévoir ce qui arriverait, si le chauffage avait lieu à la fois par le rayonnement et la transmission de la chaleur par l'air.

Dans ce qui précède, j'ai supposé que la température de la pièce devait être maintenue constamment à une certaine température. Je ne connais que les hôpitaux dans lesquels il soit nécessaire d'avoir jour et nuit la même température dans les salles. Cette permanence peut être obtenue par une combustion continue dans les foyers, ou, malgré une interruption de chauffage de nuit, par des réservoirs d'eau chaude qui se refroidissent lentement. Mais, à moins que les murailles n'aient qu'une bien faible épaisseur, la chaleur qu'elles renferment est presque toujours suffisante pour maintenir la température pendant la nuit sans diminution notable.

En général, quand les bâtiments ont des murailles d'une suffisante épaisseur, les chauffages de nuit sont inutiles, et on peut presque toujours, le matin par un chauffage actif et dans un petit nombre d'heures, réparer en grande partie la perte du régime qui a eu lieu pendant la nuit.

Quand les murailles n'ont qu'une faible épaisseur; comme dans certaines usines, elles se refroidissent beaucoup pendant la nuit; mais on parvient encore facilement à les échauffer, en commençant le chauffage un certain nombre d'heures avant l'arrivée des ouvriers : nombre variable avec la température extérieure.

Lorsque les édifices ont d'épaisses murailles, et que les pièces ne sont employées que certains jours à certaines heures, ce serait une grande dépense que d'y maintenir un régime constant dans la température des murailles, ou du moins de le rétablir complètement lorsque les pièces doivent être utilisées. Il faut alors, pendant quelques heures d'un chauffage très-vif, échauffer partiellement les murailles, et compenser leur faible température par un plus grand échauffement de l'air pendant l'occupation des pièces.

Dans tous les cas, excepté dans les foyers domestiques, la chaleur développée par le foyer est employée à chauffer des surfaces qui transmettent ensuite la chaleur; ces surfaces peuvent être chauffées directement, ou par l'intermédiaire de la vapeur ou de l'eau chaude. De là, une grande diversité dans la nature et les dispositions des appareils. Chaque mode de chauffage a des avantages et des inconvénients; en outre, dans chaque édifice à chauffer, il y a des circonstances particulières, et des conditions à remplir souvent fort différentes. Ainsi, il n'existe aucun mode de chauffage qui, dans tous les cas possibles, soit toujours supérieur à tous les autres.

Dans quelques circonstances, quand les pièces à chauffer sont rapprochées, et surtout quand il s'agit d'économiser les frais de premier établissement, ce sont les calorifères à air chaud qui sont préférables. Quand il importe que la température n'éprouve que de faibles variations, que les pièces sont peu nombreuses, voisines du lieu où le calorifère doit être établi, ce sont les calorifères à vapeur ou à eau chaude qu'il convient d'employer. Quand les distances à parcourir sont considérables, le chauffage à vapeur, ou à eau chaude, par des circuits partiels dont les réservoirs sont chauffés par la vapeur, doit être préféré; parce que la vitesse de circulation de l'eau chaude diminue rapidement à mesure que la longueur du circuit augmente, et que les pertes de chaleur par ces tuyaux, qui ont toujours un grand diamètre, sont très-considérables. Mais si les pièces étaient nombreuses, éloignées du calorifère, un chauffage par la vapeur seule, ou par la vapeur et l'eau sans circulation, serait préférable, à cause de la facilité de répartir la chaleur et du faible refroidissement qu'éprouveraient les tuyaux de conduite par suite de leur petit diamètre.

On a pensé jusqu'ici, que quand il s'agissait de maintenir une température constante de jour et de nuit dans une pièce, on ne pouvait employer que les calorifères à eau chaude, à cause de la grande quantité de chaleur renfermée dans la masse d'eau en circulation, dont le refroidissement étant très-lent, maintenait la température, malgré l'extinction du foyer pendant la nuit. Mais, quand les murailles du bâtiment ont une grande épaisseur et que le régime a été établi, elles contiennent une quantité de chaleur incomparablement plus grande que celle des tuyaux à eau chaude, et concourent dans une bien plus grande proportion au maintien de la température: c'est d'ailleurs ce qui résulte des expériences que nous avons rapportées et surtout de celles faites dans l'église Saint-Roch, qui font voir avec quelle lenteur la température intérieure décroît après la cessation du chauffage. Les calorifères à eau chaude ne sont réellement nécessaires qu'autant qu'ils doivent chauffer jour et nuit l'air de ventilation à une température à peu près constante, et que le chauffage doit être interrompu pendant la nuit; et même, dans ce cas, des

poêles à eau chaude, chauffée par la vapeur, remplacerait sans inconvénients les poêles à eau chaude chauffés par circulation.

Dans tous les cas, les formules que nous donnerons dans le chapitre suivant, permettront de calculer les surfaces de chauffe avec une approximation suffisante.

Ventilation. Quant à la ventilation, les moyens de la produire sont moins nombreux. La ventilation ne peut s'effectuer que par l'appel d'une cheminée ou par une machine. Dans tous les cas, l'air de ventilation doit être amené par des calorifères à une température convenable. Quand le volume d'air échauffé est considérable, la chaleur qui passe à travers les vitres et les murailles peut être fournie par un excès de température de l'air chaud qui pénètre dans la salle; mais, quand le volume de l'air de ventilation n'est pas très-grand, il faudrait quelquefois porter sa température à un degré trop élevé; alors il est avantageux de fournir la chaleur de transmission des parois, par le rayonnement de poêles échauffés par la fumée, la vapeur, ou l'eau chaude.

Ventilation par une cheminée d'appel. Une cheminée d'appel est un canal vertical ouvert par les deux bouts, communiquant par la partie inférieure avec l'espace d'où l'air doit être extrait, et dans lequel l'air est échauffé. L'espace chauffé et ventilé, communiquant avec l'atmosphère par l'orifice qui amène l'air extérieur dans le calorifère, le mouvement de l'air provient de la force ascensionnelle de l'air chaud depuis l'orifice que nous considérons jusqu'à l'extrémité de la cheminée. Dans la partie de l'année où l'air ne doit pas être chauffé, et où la température intérieure diffère peu de la température extérieure, l'effet de la cheminée ne provient que de l'excès de température que l'air y reçoit. En hiver, la force ascensionnelle de l'air dans la cheminée provient de l'excès de la température de l'air qu'elle écoule sur celle de l'air extérieur; par conséquent, pour produire le même effet, l'air doit y être moins échauffé. Cela est tellement vrai, que si on ne chauffait pas du tout l'air dans la cheminée d'appel, elle produirait encore un effet puissant dû à l'excès de la température intérieure sur celle de l'air extérieur; c'est un fait bien constaté par l'expérience. Ainsi, c'est en été que l'air des cheminées d'appel doit être le plus échauffé pour que l'appel reste le même. C'est donc pour la ventilation d'été que tous les éléments de tirage d'une cheminée d'appel doivent être déterminés.

Considérons une cheminée, appelant par sa partie inférieure, de l'air extérieur à travers des canaux plus ou moins longs; son action, qui résulte de l'excès de sa température sur celle de l'air extérieur, constitue une force constante dirigée de bas en haut, qui augmente avec l'excès de température et avec la hauteur de la cheminée. Mais cette force ne peut jamais produire tout son effet, à cause des frottements de l'air dans la cheminée et dans tout le canal qu'il parcourt depuis l'orifice qui donne accès à l'air extérieur, et surtout des résistances provenant des variations de sections et des changements brusques de direction dans tout le circuit. Ou, en d'autres termes, le travail réel produit par une cheminée d'appel est égal à son travail normal, diminué du travail correspondant aux frottements et aux variations brusques de vitesse et de direction.

Examinons d'abord l'influence de la hauteur et des résistances. Mais remarquons, que quelles que soient la longueur d'un canal, ses sinuosités, ses variations de section, la résistance que l'air éprouvera à le parcourir, pourra toujours être représentée par celle d'un ca-

nal rectiligne ayant une section égale à celle de la cheminée et une certaine longueur. D'après cela, considérons successivement des cheminées de 1 mètre carré de section, renfermant de l'air à 30 degrés, l'air extérieur étant à 0 degré, et ayant 5, 10, 15, 20, 25, 30 mètres de hauteur; et supposons que l'air soit appelé à travers un canal de 1 mètre carré de section, ayant successivement pour longueur, 0, 10, 20, 40, 60, 100, 200 mètres. En admettant le coefficient de frottement 0,00125, qui résulte des nombreuses expériences faites sur l'écoulement de l'air froid dans de longs tuyaux de conduite, par M. Daubusson et par M. Gérard, on trouve par le calcul les résultats suivants¹: les premiers nombres correspondent évidemment au cas où l'air extérieur serait appelé immédiatement dans la cheminée.

Hauteur 5 mètres, vitesse théorique 2 ^m ,95 :	2 ^m ,79; 2 ^m ,52; 2 ^m ,32; 2 ^m ,04; 1 ^m ,83; 1 ^m ,57; 1 ^m ,20.
Hauteur 10 mètres, vitesse théorique 4 ^m ,18 :	3 ^m ,74; 3 ^m ,42; 3 ^m ,17; 2 ^m ,80; 2 ^m ,53; 2 ^m ,17; 1 ^m ,68.
Hauteur 15 mètres, vitesse théorique 5 ^m ,12 :	4 ^m ,37; 4 ^m ,02; 3 ^m ,75; 3 ^m ,33; 3 ^m ,03; 2 ^m ,61; 2 ^m ,22.
Hauteur 20 mètres, vitesse théorique 5 ^m ,91 :	4 ^m ,84; 4 ^m ,48; 4 ^m ,19; 3 ^m ,76; 3 ^m ,43; 2 ^m ,97; 2 ^m ,33.
Hauteur 25 mètres, vitesse théorique 6 ^m ,60 :	5 ^m ,20; 4 ^m ,84; 4 ^m ,55; 4 ^m ,15; 3 ^m ,76; 3 ^m ,27; 2 ^m ,59.
Hauteur 30 mètres, vitesse théorique 7 ^m ,24 :	5 ^m ,49; 5 ^m ,14; 4 ^m ,85; 4 ^m ,60; 4 ^m ,20; 3 ^m ,64; 2 ^m ,86.

La section commune des cheminées étant égale à 1 mètre carré, ces nombres représentent les volumes d'air froid appelés. Il résulte de l'inspection de ces nombres que le tirage d'une cheminée d'appel augmente avec sa hauteur et que son effet croît avec les résistances à vaincre. Considérons par exemple les deux cheminées de 30 mètres et de 15 mètres de hauteur; lorsqu'elles appellent directement l'air extérieur, les vitesses d'appel sont 5,49 et 4,37 dont le rapport est 1,25; et quand elles aspirent l'air à travers un canal de 200 mètres, les vitesses sont 2,86 et 2,22 dont le rapport est 1,29.

Ainsi, comme la hauteur d'une cheminée est un élément de tirage qui ne coûte que des frais de construction et point de dépenses journalières, il faut toujours donner aux cheminées d'appel la plus grande hauteur possible.

1. En désignant par v la vitesse avec laquelle l'air pénétrerait dans la cheminée, s'il n'y avait pas de frottements, par v' la vitesse réelle d'accès, par H la hauteur de la cheminée, par L la longueur du canal, par D son diamètre, et par K le coefficient de frottement, on aura

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{v'^2}{2g} + \frac{(H+L)Kv'^2}{D}; \text{ d'où } v'^2 = \frac{v^2 D}{D + 2g(H+L)K} \dots \dots [a],$$

et comme $v^2 = 2gHat : (1 + at)^2$, t représentant l'excès de température de l'air de la cheminée sur celui du canal, il vient

$$v' = \frac{1}{1 + at} \sqrt{\frac{2gHDat}{D + 2g(H+L)K}} \dots \dots [b].$$

Examinons maintenant l'influence de la température. Mais remarquons d'abord, que pour une même cheminée, le rapport de la vitesse réelle d'appel à la vitesse théorique est un nombre constant qui ne dépend que des dimensions de la cheminée, de celles du canal qui y amène l'air, et qui est entièrement indépendant de l'excès de la température de l'air dans la cheminée; par conséquent, pour toutes les cheminées, l'influence des variations de température est la même¹. Or, on trouve, que pour des excès de température de

10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80°, 90°, 100°, 200°, 300°, 400°, 500°,

les vitesses d'accès de l'air froid sont proportionnelles aux nombres,

3,05; 4,17; 4,93; 5,51; 5,98; 6,35; 6,66; 6,92; 7,13; 7,33; 8,17; 8,27; 8,13; 7,92.

Ces nombres croissent très-lentement, et au delà de 300°, ils diminuent. Il est facile de s'en rendre compte. En effet, la vitesse d'écoulement de l'air chaud par l'extrémité supérieure de la cheminée, croît avec l'excès de température et proportionnellement à la racine carrée de cet excès; ainsi le volume d'air chaud qui s'écoule par seconde, augmente constamment avec la température; mais cet air est de plus en plus dilaté, et pour en déduire le volume d'air froid qui entre dans la cheminée, il faut diviser le volume d'air chaud par un nombre qui augmente avec l'excès de température, par conséquent le volume d'air froid appelé croît moins rapidement, avec l'augmentation de température, que le volume d'air chaud écoulé; et comme, pour une petite variation de température, la vitesse d'écoulement de l'air chaud augmente moins rapidement que le nombre par lequel il faut le diviser pour obtenir le volume d'air froid correspondant, il s'ensuit qu'au delà d'une certaine température le volume d'air froid va en décroissant.

Il résulte des nombres que nous venons de citer, qu'on ne peut augmenter l'effet d'une cheminée d'appel, que par un très-grand accroissement de température. Considérons par exemple une cheminée renfermant de l'air à 30 degrés, l'air extérieur étant à 0 degré; pour augmenter seulement de moitié l'effet qu'elle produit, il faudrait que sa vitesse fût augmentée dans le rapport de 4,93 à 4,93.³/₂ ou dans celui de 4,93 à 7,39; ainsi la température de l'air devrait être portée à plus de 200 degrés. Il serait impossible de doubler la vitesse; car c'est à peu près à 300 degrés qu'existe le maximum, et à cette température, cette vitesse est seulement égale à 1,67 de celle qui existe à 30 degrés.

1. La formule [a], page 70, donne

$$\frac{v'}{v} = \sqrt{\frac{D}{D + 2g(H+L)K}}$$

Ainsi, le rapport entre la vitesse réelle et la vitesse théorique est constant et indépendant de l'excès de température de l'air. La formule [b], page 70, donne

$$v = M \sqrt{\frac{t}{(1+at)^2}} = M \frac{\sqrt{t}}{1+at}$$

M étant un nombre constant pour la même cheminée. Ainsi, en calculant les valeurs de $\sqrt{t} : (1+at)$ pour différentes valeurs de t , on obtiendra des nombres qui seront proportionnels aux vitesses d'accès réelles et théoriques correspondantes à ces excès de températures.

Il résulte aussi de ce qui précède, que si une cheminée ayant 30 mètres de hauteur renfermait de l'air ayant un excès de température de 30 degrés, des cheminées de même section et dans les mêmes circonstances, qui auraient 25, 20, 15, 10 mètres de hauteur, pour produire le même effet, devraient contenir de l'air à peu près à 35, 43, 60, 95 degrés. Pour une cheminée de 5 mètres, la chose serait impossible.

Dans ce qui précède, j'ai supposé que la cheminée avait une section égale à celle du conduit qui y amène l'air, ou à la somme des sections des canaux qui y débouchent, quand il y en a plusieurs. Mais si on donnait à la cheminée une plus grande section, cet accroissement de section produirait un accroissement de tirage, comme je l'ai démontré par un grand nombre d'expériences faites sur une grande échelle, et cet accroissement de tirage, ainsi que celui qui résulte d'un accroissement de hauteur de la cheminée, ne coûterait qu'une faible dépense de construction.

Les principes généraux, que je viens de rappeler, nous permettent de reconnaître les conditions dans lesquelles les grandes cheminées d'appel doivent être établies.

D'abord, elles doivent avoir une grande hauteur, 15 à 20 mètres, et même plus, si leur section était très-considérable. Elles doivent être construites en briques, afin d'éviter le refroidissement de l'air; et surtout pour que la grande quantité de chaleur renfermée dans les briques maintienne la température de l'air, malgré les variations d'activité du foyer, et même entretienne la ventilation, avec un faible décroissement, pendant des intermittences de chauffage qui ne seraient pas de longue durée.

La cheminée ayant une certaine hauteur, on pourrait, en lui donnant une section plus grande, appeler le même volume d'air froid, avec un moindre excès de température; on produirait ainsi la ventilation avec très-peu de combustible. Mais, à mesure que l'excès de température diminuerait, la section de la cheminée augmentant, la vitesse d'écoulement diminuerait aussi; alors les vents pourraient avoir une grande influence sur le tirage, et, dans certaines circonstances, la cheminée pourrait produire un effet opposé. Il y a donc une limite dans la vitesse d'écoulement au-dessous de laquelle il serait dangereux de descendre. On admet assez généralement, pour les cheminées de 15 à 20 mètres de hauteur, un excès de température de 30 degrés sur celle de l'air extérieur; cet excès produit alors une vitesse suffisante pour éviter les influences atmosphériques.

Si la cheminée et le canal qui amène l'air froid devaient avoir partout la même section, connaissant l'excès de température de l'air dans la cheminée et la longueur du canal, il serait très-facile de déterminer la section commune du canal et de la cheminée, pour que le volume d'air appelé par seconde, fût exactement celui qui est donné; et les calculs qu'on emploierait pour cela, résultant d'expériences nombreuses faites sur une grande échelle, ne présenteraient aucune incertitude. Mais, dans les lieux qui doivent être ventilés, les mouvements de l'air sont bien autrement compliqués; le canal parcouru par l'air depuis l'orifice d'accès jusqu'à la cheminée, varie de section dans de très-grandes proportions, souvent brusquement et un grand nombre de fois; quelquefois l'air passe à travers des orifices percés dans de minces cloisons; enfin, il y a souvent dans les canaux, des changements brusques de direction. Ainsi, il est impossible de calculer, même approximativement, la section que doit avoir une cheminée d'appel pour produire un effet donné; il

faut alors donner à la cheminée un excès de section, et régler son tirage par un registre convenablement placé : la position du registre serait déterminée par des expériences anémométriques. Cette méthode permettrait, en ouvrant le registre et en brûlant plus de combustible dans le foyer, d'augmenter la ventilation dans une très-grande proportion, ce qui ne serait pas possible par le seul effet du foyer. Alors, l'incertitude qui existe sur la section exacte que doit avoir la cheminée, se porterait uniquement sur l'accroissement d'effet qui serait produit dans des circonstances exceptionnelles, lorsque le registre serait complètement ouvert. Il est important de remarquer, que si on pouvait calculer exactement la section de la cheminée, il faudrait toujours lui donner une section plus grande, pour les cas où une ventilation plus puissante serait nécessaire, et régler le tirage par un registre qui resterait ordinairement dans la même position.

Pour des cheminées d'appel, dans lesquelles l'air ne pénètre qu'après avoir parcouru de très-longs circuits, il faudrait supposer, que la vitesse réelle d'entrée de l'air dans la cheminée est à peu près les 0,25 ou les 0,30 de la vitesse théorique, c'est-à-dire, de celle qui aurait lieu, si l'air n'éprouvait aucune résistance ; et à peu près les 0,40, si le circuit était court, pourvu que le minimum de section dans le circuit excédât la section de la cheminée. Ces cheminées auraient un excès de puissance, qu'on utiliserait quand les circonstances l'exigeraient. Ces nombres résultent des expériences faites sur plusieurs grandes cheminées d'appel.

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse d'une ventilation de 12 000 mètres cubes d'air à l'heure, par une cheminée de 15 mètres de hauteur ; la ventilation sera de 3^m,33 par seconde ; en supposant un excès de température de 30 degrés, la vitesse théorique d'accès serait à peu près de 5 mètres ; en la réduisant à 0,4, elle serait de 2 mètres, et la section de la cheminée serait de 1^m,60 ; l'excès serait à peu près d'un tiers, et, dans des circonstances exceptionnelles, la ventilation pourrait être plus que doublée. Pour une cheminée de 30 mètres de hauteur, devant appeler, à travers un très-long circuit, 30 000 mètres cubes d'air par heure, ou 8^m,33 par seconde, la vitesse théorique serait de 7^m,24 ; en comptant sur un quart, ou 1^m,81, la section serait de 4^m,6, et il y aurait en général un excès de ventilation de près d'un tiers, qui serait ordinairement annulée par la position du registre.

En prenant pour la vitesse réelle, une plus petite fraction de la vitesse théorique, on tiendrait évidemment en réserve un plus grand excès de ventilation, utilisable dans le besoin ; mais alors, il serait important que le registre fût placé à la partie supérieure de la cheminée, afin que la vitesse de sortie fût ordinairement assez grande pour résister aux influences atmosphériques.

Examinons maintenant la disposition du foyer.

Le foyer ne devrait être placé dans la cheminée, qu'autant que les orifices d'appel de l'air déboucheraient tous au-dessus de la grille, excepté celui qui alimenterait le foyer. En effet, quand les orifices débouchent dans le cendrier, si le combustible est étalé sur une large grille, il réduit plus ou moins la section libre, et, par suite, on pourrait diminuer le tirage en activant le foyer ; on pourrait même le réduire à 20 mètres cubes par kilogramme de houille brûlée, si la grille occupait toute la section de la cheminée et si elle était com-

plètement couverte de combustible, car alors le foyer rentrerait dans le cas des foyers ordinaires. Si, au contraire, le combustible est ramassé sur une petite grille, le courant d'air chaud qui s'en dégage ne se mêle avec l'air appelé qu'à une hauteur plus ou moins grande, ce qui produit une diminution de tirage; et même, si la cheminée n'avait pas une grande hauteur par rapport à sa section, il pourrait se produire un appel par le haut de la cheminée qui supprimerait celui d'en bas. La disposition la plus convenable, consiste à placer le foyer à côté de la cheminée, et à faire arriver les gaz provenant de la combustion dans un canal en fonte, annulaire, horizontal, concentrique à la cheminée, et percé de trous équidistants; l'air d'appel alimentant le foyer, la cheminée n'écoule que l'air de ventilation, l'air chaud se distribue également dans toute la section, et le tirage est parfaitement uniforme dans tous ses points. C'est la disposition qui a été employée à Mazas.

Reste maintenant la manière de diriger le foyer. Mais calculons d'abord la dépense qu'exige le chauffage direct de l'air, et pour cela prenons un exemple particulier. Supposons qu'il s'agisse d'une grande salle maintenue à 15 degrés, dans laquelle passe 12 000 mètres cubes d'air par heure, la cheminée ayant un excès de température de 30 degrés sur celle de l'air extérieur. La température moyenne des cinq mois d'hiver, étant à Paris de 7 degrés, et l'air de la salle étant à 15 degrés, il s'ensuit, que l'air de la cheminée devra recevoir moyennement, un accroissement de température de 22 degrés pendant l'hiver. Alors, la quantité d'unités de chaleur consommée par heure sera de $12000 \cdot 1,3 \cdot 22 : 4 = 85800$ unités, qui représentent à peu près $12^k,25$ de houille. En été, en supposant que la température de la salle ne diffère pas sensiblement de la température extérieure, la quantité de chaleur consommée serait de $12000 \cdot 1,3 \cdot 30 : 4 = 117000$ unités, qui correspondent à $16^k,7$ de houille. Si on supposait, que la salle ne fût occupée que six heures par jour, et que le prix de la houille fût de 3 francs les 100^k, la ventilation d'hiver coûterait 2 francs 20 centimes par jour, et celle d'été à peu près 3 francs.

Si le foyer d'appel brûlait constamment 12 à 13 kilogrammes de houille par heure en hiver, condition qu'il serait facile de remplir, le tirage augmenterait quand la température extérieure s'abaisserait, et il diminuerait quand cette température s'élèverait. Mais ces variations seraient assez faibles; car, pour des excès de 20, de 30 et de 40 degrés, le tirage de la cheminée varierait dans le rapport des nombres 4,17; 4,93 et 5,51. La ventilation d'été, pour une combustion régulière de 16 à 17 kilogrammes de houille à l'heure, serait sensiblement constante, en supposant toutefois, que l'air de la salle différât peu de la température extérieure.

Si, pour économiser du combustible pendant l'hiver, on plaçait dans la cheminée d'appel, un tuyau court, en fonte, servant à l'écoulement de la fumée du calorifère, on pourrait utiliser une certaine partie de la chaleur perdue; mais il pourrait arriver que la ventilation fût tantôt trop grande, tantôt trop petite; et elle serait nécessairement variable, puisque la consommation de combustible dans le calorifère change avec la température extérieure. Il est même remarquable, que les consommations de combustible dans le calorifère et celle du chauffage de l'air dans la cheminée, pour obtenir une ventilation constante, varient en sens contraire, par les variations de la température extérieure; en effet,

quand la température extérieure s'abaisse, la consommation de combustible du calorifère doit augmenter, pour maintenir au même degré la température intérieure, tandis que celle du foyer d'appel doit diminuer, parce que l'excès de la température de l'air dans la cheminée sur celle de l'air doit rester constante. On ne pourrait réaliser l'économie dont il est question, qu'à la condition d'avoir un instrument fixe, qui indiquerait à chaque instant l'état de la ventilation, et un foyer dont on pourrait à volonté faire varier l'effet. On pourrait diminuer la ventilation, si elle était trop grande, au moyen d'un registre placé à la partie inférieure de la cheminée, et l'activité du foyer, par un registre placé en avant du cendrier.

L'instrument dont nous venons de parler, qui devrait indiquer à chaque instant l'état de la ventilation, est réellement indispensable dans tous les cas, qu'on utilise ou non, une partie de la chaleur perdue par le calorifère, non-seulement, pour servir de guide au chauffeur, mais comme contrôle permanent de la ventilation.

La vitesse d'écoulement de l'air dans une cheminée, pourrait être donnée, à chaque instant, par un anémomètre à pression placé dans la cheminée, qui ferait mouvoir une aiguille parcourant un cadran, dont la circonférence porterait les indications des volumes d'air expulsés, correspondants à chaque position de l'aiguille. Ces appareils auraient été gradués avec des anémomètres à ailettes. Ils peuvent être disposés d'un grand nombre de manières différentes.

On pourrait se servir de la disposition employée par M. Sagey dans la prison de Tours. Elle consiste, comme nous l'avons dit, en une tige mobile autour d'un axe horizontal, perpendiculaire à sa direction, portant à l'extrémité qui se trouve dans la cheminée, une plaque horizontale, à l'autre extrémité un petit poids curseur dont on fait varier la position de manière que, sous l'influence du courant d'air, la tige reste horizontale. Par des expériences anémométriques, on déterminerait les positions du poids curseur qui correspondent à différentes vitesses de l'air dans la cheminée, et surtout, à celle qui doit être maintenue. Mais cette disposition exigerait une opération, toutes les fois qu'on voudrait estimer la ventilation; il serait plus commode de mesurer la ventilation par l'inclinaison de la tige. Pour obtenir de plus grands écarts pour les mêmes variations de vitesse, l'appareil devrait être modifié de la manière suivante. La plaque serait remplacée par un cylindre creux, fermé par les deux bouts, dont l'axe horizontal serait perpendiculaire à la tige, et dont la surface serait garnie d'un très-grand nombre de petites plaques situées dans des plans passant par l'axe du cylindre, d'une petite hauteur et de même longueur; par cette disposition, la pression de l'air sur le cylindre sera plus grande que s'il était nu, et elle restera la même, quelle que soit l'inclinaison de la tige. Un contre-poids serait fixé sur la tige, de l'autre côté de l'axe de rotation, de manière que le centre de gravité de l'appareil se trouvât sur l'axe; et pour que l'instrument eût un équilibre stable, et pour en régler la sensibilité, on fixerait, dans un plan vertical sur la tige mobile, de chaque côté de l'axe de rotation, deux petites tiges qui se termineraient par une autre perpendiculaire à la tige mobile, cette dernière serait filetée et porterait un petit écrou dont la position déterminerait la sensibilité de l'instrument.

On pourrait aussi employer la force de torsion pour faire mouvoir l'aiguille qui indi-

querait la ventilation, il serait facile d'en imaginer la disposition, mais l'appareil serait plus compliqué que celui dont nous venons de parler.

Comme je l'ai déjà dit, ces instruments seraient gradués sur place, par des expériences dans lesquelles la vitesse d'écoulement de l'air serait mesurée par des anémomètres à ailettes, et il suffirait d'observer la position de l'aiguille correspondant à la vitesse normale, et à un certain nombre de vitesses plus grandes et plus petites.

Après avoir indiqué la disposition du foyer d'appel qui me paraît la plus avantageuse quand l'air est chauffé directement, et l'appareil indispensable pour que le chauffeur puisse conduire son foyer, je dirai quelques mots sur certains modes de chauffages employés et qui sont évidemment vicieux.

On peut effectuer la ventilation par le foyer du calorifère, en donnant à la grille du foyer une grande surface et en ne la couvrant qu'en partie de combustibles. Ce mode de chauffage ne vaut absolument rien; l'effet utile du combustible pour le chauffage du calorifère serait beaucoup diminué, parce que l'air chaud en sortant du foyer serait à une température plus basse que si la grille était entièrement couverte de combustibles et s'il n'entraît dans le foyer que le volume d'air nécessaire à la combustion; en outre, la ventilation coûterait beaucoup plus de combustibles que par un foyer spécial, parce que l'air serait versé dans la cheminée à une température très-élevée. Supposons, par exemple, qu'on appelle dans le cendrier 200 mètres cubes d'air par kilogramme de houille brûlée dans le foyer; c'est-à-dire $200 \cdot 1^{\text{k}},3 = 260^{\text{k}}$; des 7500 unités de chaleur produites par la combustion, une petite partie pénétrera par rayonnement dans les surfaces des calorifères voisines du foyer, le reste se distribuera dans les 260 kilogrammes d'air; si on négligeait la chaleur provenant de ce rayonnement, comme il faut $260 : 4 = 65$ unités de chaleur pour échauffer la masse d'air de 1 degré, elle serait portée à $7500 : 65 = 115^{\circ}$; si cet air était à une température plus basse, et si le calorifère était à eau chaude ou à vapeur, l'eau chaude ou la vapeur étant à une température supérieure à 100 degrés, l'eau chaude ou la vapeur échaufferait encore l'air, et il ne se refroidirait que s'il était à une température beaucoup supérieure à 100 degrés. Ainsi, ce mode de ventilation est un bon moyen pour diminuer ou supprimer la chaleur qui passe dans le calorifère, même pour diminuer celle qui s'y trouve accumulée, et pour élever inutilement la température de l'air de ventilation dans la cheminée. En outre, la ventilation et le chauffage étant produits par le même foyer, il est impossible de régler ni l'un ni l'autre, parce que chacun exige des quantités de chaleur différentes et qui varient en sens contraire avec la température extérieure. En un mot, avec ce mode de ventilation on ne sait jamais ce qu'on fait, ni pour le chauffage, ni pour la ventilation. Le tirage par un foyer de calorifère ne pourrait être avantageux qu'autant que le volume de l'air appelé ne dépasserait pas celui qui est nécessaire pour la combustion, c'est-à-dire de 18 à 20 mètres cubes par kilogramme de houille, mais cette ventilation est, en général, très-petite relativement à celle qui doit être produite. Il y a même dans ce cas un inconvénient grave, la cheminée d'appel et le foyer agissant simultanément pour dilater l'air qui se trouve dans le même espace, ils se contrarieraient; chacun d'eux produirait moins d'effet et le tirage de la cheminée serait diminué. On comprend d'ailleurs facilement, que l'air appelé dans le foyer du calorifère serait de l'air

qui a parcouru tous les canaux de circulation du calorifère et en outre l'espace dans lequel il s'est disséminé pour produire l'assainissement, de là, une résistance que doit vaincre la cheminée du calorifère, une diminution de tirage, souvent une mauvaise combustion, et tout cela pour une économie insignifiante. En effet, on économise pour chaque kilogramme de houille brûlée, le chauffage dans la cheminée de 20 mètres cubes d'air, au plus en hiver de 20 degrés, ce qui correspond à 130 unités de chaleur, qui représentent les 0,02 de la quantité de chaleur développée par 1 kilogramme de houille ; une pareille économie est illusoire, car les effets produits, par le même poids de combustible, brûlé sur la même grille, dans les mêmes circonstances, varient dans des limites bien plus étendues suivant l'habileté du chauffeur. J'ai insisté, peut-être un peu trop longuement, sur la ventilation par les foyers des calorifères ; mais j'ai cru devoir le faire, parce que beaucoup d'appareils de ventilation ont été établis sur ce principe, que quelques personnes prétendent que cette ventilation ne coûte rien, et que j'ai vu cette singulière opinion imprimée et signée par des personnes, fort capables du reste, mais qui avaient été séduites par les apparences.

Il semble au premier abord, qu'il y aurait de l'avantage, sous le rapport de la régularité de la ventilation, à échauffer l'air par un calorifère à eau chaude, avant son entrée dans la cheminée : les petites variations d'intensité du foyer seraient atténuées par la masse d'eau en circulation ; mais, comme le démontrent très-bien les expériences faites à Mazas et à Provins, la quantité de chaleur renfermée dans la maçonnerie de la cheminée produit cet effet. Cette disposition n'aurait alors que des inconvénients, la dépense de combustibles serait plus grande et les frais de premier établissement en pure perte.

Il y a cependant des circonstances dans lesquelles il serait nécessaire de l'employer, c'est quand les cheminées d'appel sont éloignées des foyers des calorifères, par exemple, quand elles partent des combles des édifices, et qu'on ne pourrait pas y établir des foyers, par la difficulté de les surveiller, ou par la crainte d'un incendie.

Mais il y a un mode de chauffage de l'air de ventilation qui est employé dans le grand amphithéâtre du conservatoire, dont il m'est impossible de comprendre le motif, l'air est d'abord échauffé en parcourant un canal renfermant un tuyau à eau chaude et ensuite en traversant un foyer.

On a aussi imaginé, comme nous l'avons dit précédemment, de chauffer l'air de ventilation, par un tuyau à circulation d'eau chaude, d'une grande longueur, et placé dans la cheminée d'appel. C'est une très-mauvaise disposition, car une grande partie de la chaleur dépensée est sans influence sur le tirage. En effet, l'air qui s'élève dans la cheminée étant en contact avec le tuyau d'eau chaude s'échauffe progressivement, et comme le tirage d'une cheminée résulte de la température moyenne de l'air qui s'y trouve, et que la consommation de chaleur dépend de la température de l'air à sa sortie, il s'ensuit évidemment, que ce mode de chauffage occasionne une grande perte de chaleur. Si, par exemple, l'air entrant dans la cheminée à 15 degrés, et y était échauffé successivement jusqu'à 60 degrés, l'air extérieur étant à 0 degré, le tirage serait le même que si l'air était de bas en haut à 45 degrés, et l'on aurait dépensé la chaleur nécessaire pour l'échauffer à

60 degrés. Cette disposition ne pourrait être justifiée que par l'impossibilité de placer un foyer au bas de la cheminée et de chauffer l'air avant son entrée dans la cheminée.

Il est évident que dans tous les modes de chauffage de l'air d'appel, la source de chaleur, quelle qu'elle soit, doit pouvoir suffire à la ventilation d'été qui exige plus de dépense de chaleur que celle des autres saisons.

Ventilation mécanique. Cherchons à déterminer les quantités de combustibles qui seraient consommées par une cheminée et par une machine, qui produiraient le même effet. Remarquons d'abord, que la force d'appel d'une cheminée est employée à vaincre les résistances que l'air éprouve dans tout son parcours, depuis l'orifice d'accès de l'air extérieur jusqu'au sommet de la cheminée, et que ces résistances restent les mêmes, quand la cheminée n'étant pas échauffée, l'air est poussé dans le canal au moyen d'une machine. Ainsi le travail de la machine devra être égal à celui de la cheminée.

Pour plus de clarté, considérons une cheminée ayant 15 mètres de hauteur, 1 mètre carré de section, renfermant successivement de l'air à 20, 30, 40, 50, 100, 200, 300, 400 degrés, l'air extérieur étant à 0 degré, et cherchons la puissance absolue du moteur, abstraction faite de toute espèce de résistance.

Les vitesses d'écoulement de l'air chaud par le sommet de la cheminée seront ¹ :

4^m,63; 5^m,67; 6^m,55; 7^m,33; 10^m,36; 14^m,65; 17^m,95; 20^m,73.

Les vitesses d'accès de l'air froid au bas de la cheminée seront ².

4^m,32; 5^m,11; 5^m,72; 6^m,20; 7^m,59; 8^m,47; 8^m,57; 8^m,43.

Les volumes d'air appelés par seconde seront représentés par ces nombres, puisque la cheminée a 1 mètre carré de section, et les poids de ces volumes s'obtiendront en les multipliant par 1^k,3, poids d'un mètre cube d'air; ces poids seront

5^k,61; 6^k,65; 7^k,43; 8^k,06; 9^k,87; 11^k,01; 11^k,14; 10^k,95.

Le travail étant égal à $p\nu^2 : 2g$, p désignant le poids du gaz, ν sa vitesse, et $2g$ le nombre 19,62, il sera représenté par les nombres :

5^{km},34; 8^{km},87; 12^{km},39; 15^{km},77; 28^{km},99; 40^{km},27; 41^{km},70; 39^{km},64 [a].

Les quantités de chaleur employées pour produire ces effets, s'obtiendront évidemment, en multipliant le poids de l'air appelé en une seconde, par l'accroissement de température et par la capacité calorifique de l'air qui est à peu près égale à 0,25. On trouve alors, pour les quantités de chaleurs perdues estimées en calories :

28^c,07; 49^c,87; 74^c,35; 100^c,71; 246^c,72; 550^c,60; 835^c,50; 1095^c,40 [b].

Si on divise chacun de ces nombres [b], par les nombres correspondants [a] qui représentent le travail, on obtiendra évidemment le prix de revient d'un kilogrammètre en unités de chaleur; en faisant ces divisions on trouve

5^c,26; 5^c,62; 6^c,00; 6^c,38; 8^c,51; 13^c,67; 20^c,05; 27^c,63. [c].

1. La formule qui donne la vitesse est $\nu = \sqrt{2ghat}$, qui, dans le cas particulier dont il s'agit, devient,

$$\nu = \sqrt{19,62 \cdot 15 \cdot 0,00365t} = \sqrt{1,0742t}.$$

2. Ces nombres s'obtiennent évidemment en divisant les derniers par $1 + 0,00365 \cdot t$.

Cherchons maintenant ce que coûte un kilogrammètre par une machine à vapeur. En admettant qu'un cheval vapeur exige 4^k de houille par heure, ou 7500.4 = 30 000 unités de chaleur, ce serait par seconde 30 000 : 3600 = 8,333, et comme un cheval vapeur équivaut à 75 kilogrammètres, 1^{km} coûte 8,333 : 75 = 0,11. Si on divise les derniers nombres [c] par 0,11, on aura évidemment pour quotients, des nombres qui représenteront les rapports des effets produits par une machine et une cheminée, consommant la même quantité de combustible. Si la cheminée avait une hauteur quelconque H, le rapport en question, relatif à cette cheminée, s'obtiendrait en multipliant les nombres qui correspondent à la cheminée de 15^m, par 15 : H. Nous avons réuni dans le tableau qui suit, les valeurs de ces rapports, pour des cheminées de 5^m, 10^m, 15^m, 20^m, 25^m, 30^m, et toujours pour des excès de températures de 20°, 30°, 40°, 50°, 100°, 200°, 300°, 400°.

H = 5 ^m	143	153	164	174	232	373	547	753.
H = 10 ^m	71	76	82	87	116	186	273	376.
H = 15 ^m	48	51	54	58	77	124	182	251.
H = 20 ^m	35	38	41	43	58	93	136	188.
H = 25 ^m	28	30	33	35	46	74	109	150.
H = 30 ^m	24	25	27	29	38	62	91	125 ¹ .

Ces nombres supposent que le travail de la machine à vapeur est employée sans perte; mais il n'en est jamais ainsi, car un ventilateur à force centrifuge, la machine la plus simple et la plus commode que l'on puisse employer, ne rend guère que 0,33 du travail qu'elle consomme, ainsi les nombres qui précèdent devraient être divisés par 3 pour représenter exactement les rapports en question.

1. La vitesse d'accès de l'air froid dans la cheminée, étant donnée par la formule $v^2 = 2gHat : (1 + at)^2$, le travail sera représenté par

$$\frac{2gHatp}{(1 + at)^2 2g} = \frac{Hatp}{(1 + at)^2} \dots \dots \dots [1].$$

Dans cette expression le poids p est égal à s.v.1^k,3.

Le travail que produirait la même quantité de chaleur dans une machine sera représenté par pt : 4.0,11 = 2,27pt, et par conséquent, le rapport des deux effets sera

$$\frac{2,27(1 + at)^2}{aH} \dots \dots \dots [2].$$

Il résulte de la formule [1], que le travail d'une cheminée est proportionnel à sa hauteur; et de la formule [2], que le rapport qu'elle représente, varie en raison inverse de la hauteur, et croît lentement avec la température.

Ces formules se trouvent dans le premier volume du *Traité de la chaleur*, page 214; j'aurais pu en déduire les derniers nombres que je viens de donner; mais j'ai préféré calculer successivement les nombres que j'ai rapportés, parce qu'ils font voir comment les vitesses de l'air chaud, celles de l'air froid, les poids de l'air appelé, et le travail varient avec l'excès de température.

Si on considérait le travail au-dessus de la cheminée, comme la vitesse y est égale à $\sqrt{2gHat}$, le travail serait Hatp, et croîtrait proportionnellement à H et à t; et le rapport représenté par l'expression [2] deviendrait 2,27 : aH, qui serait indépendant de la température. Mais ce sont les expressions [1] et [2] qu'il faut employer, parce que le travail utile de la cheminée est celui qui appelle l'air froid et non celui qui fait écouler l'air chaud par son sommet.

Ainsi, la chaleur employée à faire de la vapeur, produit beaucoup plus de travail que si elle était employée à chauffer de l'air dans une cheminée, et d'autant plus que la température de l'air dans la cheminée est plus élevée et que la hauteur de la cheminée est plus petite. Ces résultats du calcul ont été confirmés par un grand nombre d'expériences faites sur une très-grande échelle; j'en ai rapporté plusieurs dans le *Traité de la chaleur*; j'y ajouterai ici les expériences récentes faites à la prison de Tours. Une cheminée d'appel de 15^m de hauteur, dans laquelle le foyer consommait 2^k,33 de houille par heure, a été remplacée par un ventilateur produisant un effet double, et qui est mis en mouvement par un homme, exerçant si peu d'effort, qu'il tourne la manivelle avec une seule main; pour obtenir le même effet, la température de l'air dans la cheminée aurait dû être décuplée.

Nous ajouterons, qu'avec une machine, le travail pour la même pression, augmente proportionnellement à la consommation de combustible, tandis que dans une cheminée, le travail augmente très-lentement avec la dépense de combustible et jusqu'à une certaine limite, au delà de laquelle le travail décroît.

Jusqu'ici, nous avons supposé que la vapeur était entièrement employée à produire le mouvement; mais, si la vapeur étant formée à haute pression, on employait la détente de la vapeur pour faire mouvoir les machines, et la chaleur provenant de la condensation de la vapeur pour chauffer l'air de ventilation, ou à tout autre objet, le travail dépensé pour le mouvement de l'air ne coûterait rien.

Quelques exemples feront mieux apprécier les avantages qui résultent, sous le point de vue économique, de l'emploi de la ventilation mécanique.

Supposons d'abord une cheminée de 15 mètres de hauteur, de 1 mètre de section, renfermant de l'air ayant un excès de température de 30 degrés sur l'air extérieur: la vitesse théorique sera de 5^m,67; en supposant l'air extérieur à 0 degré, l'air de la salle à 15 degrés, la vitesse d'accès de l'air dans la cheminée sera égale à 5^m,67 : (1 + 0,00365.15) = 5^m,31. En admettant, que par les frottements et les résistances de toutes espèces, la vitesse soit réduite à moitié, le volume d'air appelé par seconde sera de 2^m,65, et par heure de 2,65.3600 = 9540 mètres; la dépense de chaleur par heure sera de 9540.1,3.15 : 4 = 46509 calories, ce qui correspond à peu près à 6^k,5 de houille; en été, la dépense serait à peu près de 7^k,4. Le travail $p\nu^2$: 2g serait 2,65.1,3 (2,65)² : 19,62 = 1^{km},23; le travail effectif de la cheminée sera 1,23 × 4 = 4^{km}92; et un ventilateur, pour produire cet effet, devra consommer 4^{km},92.3 = 14^{km},76, ce qui correspond à peu près à 1 : 5 de cheval, tandis que la chaleur consommée pourrait produire le travail de plus de 1 cheval et demi en hiver et de 2 chevaux en été.

Prenons, pour second exemple, la ventilation de la prison Mazas. La cheminée débite 30 000 mètres cubes d'air par heure, avec une vitesse réelle de 2^m,67; le volume d'air écoulé par seconde est de 30 000 : 3600 = 8^m,33; son poids = 8,33.1,3 = 10^k,83; et le travail utile de la cheminée est de 10,83. (2,67)² : 19,62 = 3^{km},93; mais, comme l'effet utile de la cheminée n'est que de 0,18 (page 14), la machine devrait produire 3^{km},93 : 0,18 = 22^{km}; et, comme un ventilateur ne rend que 0,33, le travail consommé par la machine serait de 22^{km}.3 = 66^{km} = 0,9 cheval de vapeur, qui correspond au plus à une

consommation de 3^k,6 de houille par heure. Mais, comme en employant une machine à détente sans condensation, le travail de la ventilation d'hiver ne coûterait rien, le travail d'été correspondrait à une consommation de houille égale à $3,6.24.30.7 = 18144^k$; tandis que, pour la même ventilation par une cheminée d'appel, on consomme (page 13) $20.24.30.5 + 25.24.30.7 = 198\ 000^k$. La différence est de 179 856^k, et le rapport à peu près celui de 1 à 10.

Le ventilateur ne devrait pas toujours agir directement sur l'air froid et le comprimer dans les pièces qui doivent être ventilées; il faudrait, quelquefois, qu'il agit en aspirant l'air vicié pour le rejeter au dehors; et cela arriverait toutes les fois que l'air vicié devrait nécessairement suivre un certain chemin. Par exemple, dans une prison disposée comme celle de Mazas, si l'air chaud était amené dans les cellules par l'action d'un ventilateur, la pression y serait plus grande qu'à l'extérieur et l'air s'écoulerait par les tuyaux de descente et ensuite par la cheminée; mais si on ouvrait la fenêtre d'une cellule, l'air des caves, comprimé par celui des autres cellules, remonterait par le tuyau de descente et infecterait la cellule. Le ventilateur devrait être placé à l'extrémité des caves, appeler l'air des cellules et le rejeter dans la cheminée d'écoulement.

Nous venons de voir les grands avantages que présente, sous le rapport économique, la ventilation mécanique; mais cette considération n'est pas la seule qu'on doive faire intervenir dans le choix du mode de ventilation; c'est par l'examen des avantages et des inconvénients que présentent les deux modes de ventilation dont il est question que l'on doit se décider. Mais ces avantages et ces inconvénients peuvent être jugés diversement, suivant les circonstances, de sorte qu'il est impossible de dire que tel système est toujours préférable à l'autre, dans toutes les circonstances qui peuvent se présenter.

La ventilation mécanique ne peut être mise en question que quand il s'agit d'une puissante ventilation exigeant un travail assez considérable. Elle a l'avantage, en général, de consommer moins de combustible que la ventilation par une cheminée d'appel, et de n'exiger aucune dépense quand on a l'emploi de la chaleur de la vapeur d'étendue; et ce mode permet de régler facilement la ventilation et de la faire varier dans des limites très-étendues. Mais elle exige de grands frais d'installation, une machine de rechange, en cas de dérangement, et la présence permanente d'un mécanicien.

La ventilation par une cheminée d'appel peut toujours être employée, pour les petites comme pour les grandes ventilations; les frais d'installation sont très-faibles, car ils se réduisent aux frais de construction d'une cheminée; et la continuité de la ventilation est assurée, parce que la ventilation ne diminue que très-lentement avec l'activité du foyer. Mais par cette méthode, la ventilation coûte plus cher que par une machine; elle a un maximum d'effet qui ne peut pas être dépassé; et, dans certaines circonstances, cette méthode présente de graves difficultés, résultant de la nécessité de réunir l'air de ventilation des différentes pièces pour le diriger vers la cheminée d'appel.

Les ventilateurs peuvent aussi être mus par des hommes, et, quoique alors, le travail coûte beaucoup plus que quand il provient de la vapeur, il est des cas où, sous d'autres rapports, il est avantageux de l'employer; mais c'est surtout dans les maisons de détention, où le travail des hommes ne coûte rien, que ce mode de ventilation devrait être employé.

Quand on considère le peu de travail qu'exigent des ventilations même assez considérables, on est conduit à un autre mode de ventilation mécanique qui serait d'une application facile. Ce mode consiste à employer le travail d'un homme, pendant un certain temps, à élever un poids, et à le faire tomber ensuite lentement; dans sa chute, il reproduirait en grande partie le travail dépensé. Nous verrons bientôt un certain nombre de cas où ce mode de ventilation serait d'une grande utilité.

Ventilation naturelle. Dans tout ce qui précède, je n'ai parlé que des moyens artificiels pour produire la ventilation. Mais elle se produit naturellement dans certaines circonstances qu'il est important d'indiquer.

Lorsqu'une pièce, chauffée par de l'air chaud, communique avec une cheminée sans foyer, l'air chaud s'écoule par la cheminée, en vertu de l'excès de sa température sur celle de l'air extérieur, et, par conséquent, avec une vitesse d'autant plus grande que cette dernière température est plus basse. Pour des excès de température de :

2° 4° 6° 8° 10° 12° 14° 16° 18° 20°

les vitesses, pour une hauteur de 15 mètres, et abstraction faite des résistances, seraient :

1^m,46; 2^m,07; 2^m,53; 2^m,93; 3^m,27; 3^m,59; 3^m,92; 4^m,14; 4^m,39; 4^m,63.

Ces vitesses ne se réaliseraient qu'autant que l'air n'éprouverait pas de résistance; mais elles seraient peu diminuées, si l'orifice d'accès de l'air dans la pièce différait peu de la section de la cheminée, et si les chemins parcourus étaient peu considérables. On voit que ces vitesses sont déjà très-grandes pour de faibles excès de température.

Enfin, si une pièce, à une température quelconque, renfermait sur une même face deux ouvertures, l'une à la partie supérieure l'autre à la partie inférieure, pour peu qu'il y eût de différence de température entre la pièce et l'extérieur, l'air extérieur entrerait par un des orifices et celui de la pièce sortirait par l'autre; effets qui, toute chose égale d'ailleurs, seraient d'autant plus marqués que les orifices seraient à des hauteurs plus différentes. Si la pièce avait des ouvertures sur deux faces opposées, l'air de la pièce se renouvellerait facilement par les vents les plus légers, et cet effet, dans les mêmes circonstances, dépendrait évidemment de la grandeur des orifices.

Remarques sur les mouvements de l'air dans les lieux ventilés. Pour qu'un lieu quelconque soit assaini par la ventilation, il ne suffit pas qu'un certain volume d'air entre et sorte du lieu dans un temps donné; car des courants d'air, qui traverseraient une pièce en suivant le plancher ou le plafond sur une petite hauteur, seraient évidemment sans utilité. A la vérité, il y aurait dans l'un et l'autre cas, des doubles courants dirigés de haut en bas et de bas en haut, plus ou moins rapprochés, résultant de l'excès de température de l'air expiré sur l'air environnant, mais ils concourraient peu à l'assainissement. On ne doit réellement regarder comme efficaces, que les courants d'air qui passent à travers la partie de la pièce qui est occupée, et surtout ceux qui sont dirigés de bas en haut ou de haut en bas.

Mais il ne suffit pas encore pour assainir une pièce, qu'un certain volume d'air la traverse de haut en bas ou de bas en haut, il faut encore que le courant d'air vertical ait une vitesse sensiblement constante dans tous les points, car ici, il ne s'agit pas de prendre

un chiffre moyen pour chaque personne ; si, par exemple, dans une moitié de la salle la vitesse était double et nulle dans l'autre, les personnes qui occuperaient cette seconde moitié, n'admettraient certainement pas, comme compensation du malaise qu'elles éprouveraient, l'excès inutile de ventilation qui aurait lieu dans l'autre moitié. En un mot, il faut que la ventilation soit à peu près uniforme dans tous les points de la salle ; c'est évidemment une condition tout aussi importante que la ventilation totale. On ne peut rien dire de général à ce sujet ; mais dans chaque cas particulier, il faut prendre les dispositions qui permettent d'approcher le plus possible de l'uniformité dont il est question.

La ventilation d'une pièce peut avoir lieu de deux manières différentes : par une diminution ou par une augmentation de la pression intérieure ; les cheminées d'appel produisent toujours le premier effet, les machines peuvent agir en produisant l'un ou l'autre. Lorsqu'il y a diminution de pression, il y a toujours un volume plus ou moins considérable d'air extérieur qui pénètre dans la pièce par les fissures des portes et des fenêtres, en formant des veines qui peuvent s'étendre à des distances plus ou moins considérables ; et quand les pièces sont nombreuses, comme il faut établir des tuyaux de communication de chacune avec la cheminée d'appel, cette condition complique beaucoup la disposition des appareils. Quand la ventilation est produite par un excès de pression, les veines d'air à leur entrée peuvent être disséminées ou placées de manière à n'avoir aucun inconvénient, et la sortie de l'air par des orifices convenablement placés, ne peut point produire de courants intérieurs nuisibles, parce que les veines n'ont lieu qu'à l'extérieur.

Les documents que j'ai rapportés et les détails que je viens de donner sur le chauffage et la ventilation, fournissent de nouvelles données sur ces importantes questions. J'indiquerai en peu de mots les dispositions qui, dans l'état actuel de la science, me paraissent préférables pour quelques classes d'édifices publics.

Églises. Je ne répéterai pas ici ce que j'ai dit (*Traité de la chaleur*, t. II, p. 446) sur la nécessité du chauffage des églises, parce que cette nécessité est maintenant bien comprise, et que déjà un grand nombre d'églises de Paris sont chauffées. Je pensais que quand les vitraux ont une très-grande étendue, la somme des petits orifices qui existent autour de chaque vitre formant une surface considérable, si on chauffait l'église par un courant d'air chaud il y aurait une trop grande perte de chaleur, et que ce qu'il y avait de mieux à faire, consistait à chauffer, à une température de 15 à 20 degrés, la partie du sol qui est ordinairement occupée. Mais les expériences faites à Saint-Roch prouvent, avec la dernière évidence, que ces églises peuvent être échauffées par un courant d'air chaud, puisque dans cette église, la somme totale des orifices par lesquels l'air peut s'échapper, s'élève à la surface énorme de 14 mètres carrés. Ainsi, toutes les églises peuvent être chauffées par de l'air chaud. Cet air s'élève des bouches placées à fleur du sol, se refroidit rapidement par la transmission latérale de la chaleur, par son mélange avec l'air environnant, et surtout par le mouvement général de l'air, de bas en haut dans toute la partie centrale ; mouvement qui résulte de celui qui existe en sens contraire dans l'air qui avoisine les surfaces des vitres et des murailles, qui sont à une température inférieure à la température moyenne de l'air dans l'église. La température moyenne de l'air à la partie supérieure de l'église diffère à peine de celle de l'air à peu de distance du sol, ce que j'avais

d'ailleurs constaté à l'église de la Madeleine, chauffée par M. Duvoir-Leblanc (*Traité de la chaleur*, tome II, page 450). Mais cet air chaud amené dans l'église, doit-il toujours provenir de l'extérieur, ou en d'autres termes, les églises anciennes ou modernes doivent-elles toujours être ventilées? C'est une question que nous examinerons après avoir rapporté quelques observations faites dans l'église Saint-Vincent de Paule de Paris, qui vient d'être chauffée par M. René Duvoir.

Le sol de la nef centrale est garni, à son contour, d'un caniveau fermé par une grille de fonte à jour qui renferme des tuyaux dans lesquels circule de l'eau chaude; ce caniveau a 0^m,60 de largeur. J'ai visité cette église un jour de la semaine et un dimanche de grande fête, lorsque la température extérieure était seulement de 2 degrés au-dessous de zéro; partout la température était convenable et à peu près de 13 degrés. Cette disposition a un inconvénient qui paraît grave au premier abord: les chaises ne peuvent pas être placées sur les grilles du caniveau, du moins quand le chauffage est actif, parce que les grilles sont à une température trop élevée; mais dans les jours de la semaine, il suffit de placer les chaises dans l'espace circonscrit par le caniveau, et pour les dimanches et les jours de fêtes, où l'affluence des fidèles est considérable, en suspendant le chauffage ces jours-là, les chaises peuvent être placées partout, et cette suspension ne diminue pas sensiblement la température, comme il est facile de le prévoir à cause de la grande quantité de chaleur renfermée dans les murailles; je m'en suis d'ailleurs assuré par l'examen des thermomètres. Par cette méthode, il n'y a point de ventilation nécessaire; mais j'ai reconnu qu'un jour de grande fête où l'église était remplie et pouvait contenir environ 2000 personnes, nulle part il n'y avait de mauvaise odeur; ainsi il se faisait une ventilation naturelle par les joints des vitres et par les portes qui s'ouvrent si fréquemment; d'ailleurs la grande masse d'air renfermée dans l'église concourait à son assainissement pendant la durée de l'office. Ce mode de chauffage permettrait d'effectuer une ventilation, quand on supposerait qu'elle est nécessaire; il suffirait pour cela, d'établir sous le caniveau contenant les tuyaux à eau chaude, un canal communiquant avec l'extérieur et garni d'un grand nombre d'ouvertures s'ouvrant au-dessous des tuyaux; il est évident que si la somme des fissures des vitraux ne présentait pas une surface suffisante, il faudrait ouvrir des orifices à la partie supérieure ou à une certaine hauteur. Il résulte des expériences thermométriques faites dans cette église, un phénomène fort singulier: à partir d'une certaine hauteur la température va en décroissant à mesure qu'on s'élève davantage; ce phénomène résulte sans aucun doute, de ce que la partie supérieure de l'église s'élevant jusqu'à la toiture, l'air y éprouve un grand refroidissement et qu'il y a des courants d'air froid descendants dans toute la surface de la grande nef. L'eau chaude ne circule dans les tuyaux que dans un seul sens; mais pour obvier à l'influence du refroidissement qu'elle éprouve dans son trajet, le tuyau, vers la fin de la course, se divise en plusieurs qui présentent une plus grande surface; il y aurait certainement de l'avantage à faire mouvoir l'eau en sens contraire, dans deux circuits placés dans le caniveau, car alors la somme des températures des tuyaux à chaque point du circuit serait sensiblement constante. M. René Duvoir pense que ce mode de chauffage est plus économique que celui qui est employé à Saint-Sulpice, parce qu'il y a moins de

chaleur transmise à travers le sol ; mais comme, dans la nouvelle disposition, il y a beaucoup plus de chaleur rayonnée contre les murailles, on ne pourrait résoudre la question qu'à l'aide d'expériences qui n'ont point été faites.

Il résulte de ces observations, qui ont eu lieu dans les circonstances les plus défavorables : faible élévation de la voûte, très-peu de surfaces libres autour des vitraux, et une réunion de personnes aussi grande que possible, qu'une ventilation artificielle n'est point absolument nécessaire ; probablement, comme je l'ai déjà dit, parce qu'il s'en produit une naturellement par l'ouverture si fréquente des portes ou les joints des vitraux, et aussi à cause du grand volume d'air renfermé dans l'enceinte qui suffit à l'assainissement pendant le petit nombre d'heures où l'église est remplie. Je crois cependant que, dans tous les cas, il faut se ménager la faculté de produire une puissante ventilation pour les circonstances extraordinaires.

D'après tout ce que je viens de dire, je pense que pour les églises anciennes ou modernes, dans lesquelles les vitraux présentent une grande surface, il faut chauffer avec ventilation, comme à Saint-Roch. Je regarde comme très-probable, que si l'air chauffé dans le calorifère provenait de l'église, il se ferait aux orifices des vitraux des sorties et des rentrées d'air qui pourraient occasionner une plus grande perte de chaleur que celle qui peut résulter d'une ventilation régulière. Pour les églises qui ne renferment que de petites surfaces vitrées, je pense que le calorifère peut prendre l'air dans l'église ; mais je crois qu'il est prudent de disposer l'appareil de manière qu'il pût, dans certaines circonstances, être alimenté par l'air extérieur, afin de produire une ventilation puissante en ouvrant quelques orifices à la partie supérieure de l'édifice. Cette disposition doit être d'autant plus vivement recommandée qu'elle n'exigerait qu'une faible dépense.

Quant à la nature des calorifères, on pourrait employer ceux dont les surfaces sont chauffées par la fumée ; mais les plus convenables sont les calorifères à eau chaude, parce qu'ils n'exigent que peu de soins et peu de surveillance. Les surfaces de chauffe peuvent être formées par les tuyaux de circulation, ou par des grands cylindres verticaux convenablement placés. La disposition dont M. René Duvoir s'est servi à Saint-Vincent de Paule, pourrait être employée, surtout si l'église ne renfermait pas de constructions souterraines nécessaires à l'établissement des autres dispositions. Dans tous les cas, il faut que pour toutes ses parties, l'appareil ait été bien étudié, et surtout, que les surfaces de chauffe soient suffisantes pour les températures extérieures les plus basses.

Hôpitaux. La nécessité du chauffage et d'une puissante ventilation dans les hôpitaux est si évidente, qu'on a lieu de s'étonner qu'on ait tardé si longtemps à s'en occuper sérieusement. Dans ces établissements, où les causes d'insalubrité sont si nombreuses et si variables, les appareils de ventilation doivent avoir une grande puissance ; ils doivent agir de jour et de nuit ; et ils doivent être disposés de telle sorte, que dans certaines circonstances, leurs effets puissent augmenter dans de très-grandes proportions.

Pour les grands établissements, je pense que le meilleur système de chauffage est le chauffage à eau chaude, chauffée par la vapeur, avec de courtes circulations, ou sans circulation ; et que le meilleur mode de ventilation est la ventilation mécanique par compression, produite par un ventilateur mû par une machine à détente sans condensation.

Je ne reviendrai pas à ce sujet sur ce que j'ai dit (pages 59 et 60) à l'occasion de l'hôpital du nord; mais j'examinerai ici les questions si importantes, de l'efficacité de toute la ventilation et de l'uniformité de sa répartition.

Considérons une grande salle inhabitée, dont les faces latérales, garnies de vitraux, sont exposées à l'air extérieur; supposons le plafond et le plancher horizontaux, et la salle échauffée par un courant d'air chaud qui arrive à une de ses extrémités, et s'échappe par la partie inférieure d'une cheminée placée à l'autre extrémité, où l'air y est plus ou moins échauffé. Le courant d'air chaud s'élèvera verticalement, en diminuant peu de section, et s'étalera sous le plafond, en refoulant vers le bas toutes les couches qui remplissaient la pièce. Ainsi, les couches d'air horizontales descendront uniformément, et dans chacune d'elles la température sera sensiblement la même dans tous les points, comme l'expérience le démontre. Mais, indépendamment de ce mouvement général, il se forme contre les surfaces de refroidissement, les vitres et les murailles, des courants d'air dirigés de haut en bas, ayant une vitesse plus ou moins grande; ces courants s'étendent sur la surface du sol, se mêlent avec les couches qui descendent du plafond et marchent vers l'orifice d'appel. Dans ce mouvement général des couches d'air de haut en bas, chaque couche horizontale possède à peu près la même température dans tous ses points, à cause de la facilité avec laquelle la chaleur se dissémine dans l'air; et le décroissement de la température de haut en bas provient de la transmission de la chaleur de couche en couche, jusqu'à celle qui s'écoule à la surface du sol. Si on suppose qu'il n'y ait qu'un seul orifice d'appel, il appellera principalement l'air le plus froid qui se trouve à la surface du sol, et la vitesse de cet air ira en diminuant rapidement avec la distance; mais si les orifices d'appel sont nombreux et uniformément répartis sur la largeur de la salle, la vitesse sera sensiblement la même sur tous les points du sol. Ainsi, l'air qui aurait fourni la chaleur qui passe à travers les vitres et les murailles, gagnerait la cheminée d'appel en suivant le plancher, et l'autre partie de l'air de ventilation descendrait verticalement; la première partie ne renouvelerait que l'air qui se trouve à une petite distance des murailles et du plancher, l'autre renouvelerait l'air qui occupe le reste de l'espace. Ces deux parties, dans lesquelles l'air de ventilation se répartira, seront dans des proportions variables, suivant la quantité de chaleur absorbée par les vitres et les murailles, et le volume d'air chaud introduit; la première partie sera d'autant plus petite que cette absorption sera elle-même plus petite, et l'autre, toutes choses égales d'ailleurs, sera d'autant plus grande que le volume de l'air chaud introduit sera plus considérable. Supposons maintenant que la salle renferme un certain nombre de poêles, ayant des surfaces étendues et douées d'un puissant rayonnement; la chaleur rayonnée chauffera les vitres et les murailles, les courants descendant contre ces surfaces diminueront de vitesse; en outre, il s'établira autour de chacun des courants ascendants qui reporteront dans la circulation l'air qui se trouve à la surface du sol, et l'air sera beaucoup mieux disséminé; et si on suppose la pièce occupée, comme chaque individu est à une température supérieure à celle de la pièce, il agira comme les poêles dont nous venons de parler, et l'effet sera encore augmenté si les personnes sont en mouvement. Pour l'été, en supposant l'air appelé, à une température inférieure à celle de la pièce, et les orifices d'écoulement à la partie supé-

rière, l'air appelé s'étalera d'abord sur le sol, il s'élèvera ensuite en partie contre les murailles, et en partie directement par des courants verticaux, et ce dernier effet sera accru par les personnes qui occuperaient la salle; ainsi les phénomènes seraient inverses de ceux qui se produisent en hiver; mais le mouvement général de l'air de bas en haut serait plus avantageux pour l'assainissement, attendu que chaque personne ne respirerait que de l'air pur, ce qui ne se produit pas en hiver, parce que le mouvement ayant lieu de haut en bas, l'air qu'on respire est déjà en partie vicié. Enfin si on supposait, ce qui ne peut réellement exister que dans des circonstances tout à fait exceptionnelles, que l'air d'appel fût exactement à la même température que l'air de la pièce et que les surfaces intérieures, l'air de ventilation serait appelé uniformément autour des orifices de sortie, et il n'y aurait qu'une partie de l'air qui agirait d'une manière efficace pour assainir la partie de la pièce qui est occupée; mais c'est un cas qui ne peut se rencontrer que rarement, et pendant une courte durée.

Il est évident que tout ce que nous venons de dire, lorsque l'appel a lieu par une cheminée, se produirait également si l'air de ventilation était poussé dans la salle par une machine; mais il faudrait, qu'en été surtout, la vitesse de l'air à l'entrée dans la salle fût très-petite, afin qu'il retombât promptement sur le sol. Ainsi les dispositions qui ont été indiquées dans le projet préféré pour l'hôpital du nord (page 59) satisfont à ces deux conditions importantes, une ventilation presque entièrement efficace, et à peu près uniformément répartie dans la partie des salles qui est occupée. Mais, il serait nécessaire que les orifices de sortie de l'air fussent placés, en été, à la partie supérieure des salles, car s'ils étaient situés plus bas, il se formerait au-dessus une couche d'air stagnant vicié qui pourrait nuire à la salubrité.

Le mode de ventilation qui conviendrait le mieux pour une salle d'hôpital, consisterait à lancer l'air par un très-grand nombre d'orifices percés dans le sol et qui environneraient les lits des malades, et à le faire sortir, dans toutes les saisons, par la partie supérieure de la salle; toute la ventilation serait efficace pour l'assainissement, elle pourrait être très-uniformément répartie, et chaque malade ne respirerait jamais que de l'air pur. Cette disposition ne présenterait aucune difficulté, mais il faudrait toujours en hiver chauffer les murailles et les vitres par le rayonnement d'un certain nombre de poêles, et une partie de la chaleur qu'ils communiqueraient à l'air par le contact, serait perdue; je dis une partie seulement et non la totalité, parce que cet air plus chaud que celui de ventilation échaufferait le plafond, qui restituerait une partie de cette chaleur par son rayonnement sur le plancher et les murailles, et que l'air qui s'élèverait autour des poêles proviendrait en partie de celui qui serait descendu contre les murailles.

Un système général de chauffage par un seul foyer, et une ventilation générale par une seule machine ou par une seule cheminée, serait évidemment applicable à tous les hôpitaux, grands ou petits. Mais à mesure que les dimensions de ces établissements diminuent, les avantages d'un mode unique de chauffage et de ventilation deviennent moins importants; d'un autre côté, la plupart des hôpitaux n'ayant que des ressources fort limitées, des améliorations qui exigeraient beaucoup de frais de premier établissement ne se réaliseraient jamais; ainsi il est nécessaire d'indiquer des dispositions simples

et économiques qui pourraient s'exécuter partout à peu de frais, et surtout qui pourraient se faire successivement.

La disposition la plus simple et la plus économique pour le chauffage et la ventilation d'une salle d'hôpital d'une médiocre grandeur, serait la suivante. A une des extrémités se trouverait un poêle en fonte de 1 mètre à 1^m,50 de hauteur et d'un diamètre convenable; il serait garni d'une enveloppe en tôle d'un plus grand diamètre, garni à sa partie supérieure, d'orifices couverts de toiles métalliques; le poêle se terminerait par un bain de sable pour le chauffage des médicaments, l'intervalle du poêle et de son enveloppe communiquerait avec l'extérieur; le tuyau du poêle traverserait la pièce pour se rendre dans une large cheminée. Cette cheminée serait pourvue d'un foyer à sa partie inférieure, et de chaque côté se trouveraient deux caisses en bois ou en plâtre, s'élevant du plancher au plafond, ayant chacune une section égale à la moitié de celle de la cheminée; chacune de ces caisses serait garnie de deux orifices, l'un à la partie supérieure, l'autre à la partie inférieure, d'une surface égale à la section des caisses, et garnies de plaques glissantes solidaires, disposées de telle sorte, que quand les orifices supérieurs seraient fermés, ceux d'en bas fussent ouverts, et réciproquement; ces coffres seraient en communication avec le cendrier du foyer et avec la cheminée au-dessus du foyer: ces dernières communications auraient ensemble la section de la cheminée. Enfin la cheminée porterait à une certaine hauteur une aiguille qui s'inclinerait plus ou moins par le courant d'air qui s'élèverait dans la cheminée. Il résulterait de cette disposition, qu'en chauffant le poêle, l'air extérieur s'échaufferait entre sa surface et celle de son enveloppe, qu'il s'élèverait au plafond et descendrait progressivement jusqu'aux orifices inférieurs des coffres, qui en hiver devraient être ouverts, et de là se dégagerait par la cheminée. En été, l'air froid arriverait par le même chemin, mais il tomberait sur le sol et parcourrait la salle de bas en haut si les orifices du haut des coffres étaient ouverts et si le foyer d'appel était allumé. Si la salle était très-longue, il faudrait placer un poêle à chaque extrémité et la cheminée d'appel au milieu. Pour se réserver la faculté de produire une ventilation très-puissante, si cela devenait nécessaire, il faudrait donner à la cheminée d'appel un excès de section, et réduire le tirage, dans les circonstances ordinaires, par un registre tournant autour d'un axe horizontal placé à une certaine distance du foyer.

Ce mode de chauffage et de ventilation est très-simple, et il serait très-efficace si toutes les dimensions des appareils étaient convenables; il coûterait beaucoup moins que ceux dans lesquels la chaleur est produite par un seul foyer ainsi que l'appel, et il a le grand avantage de permettre d'établir les appareils successivement dans les différentes salles. A la vérité, l'air ne serait pas réparti aussi uniformément que si l'air extérieur s'élevait autour de chaque lit, et l'air respiré par chaque malade ne serait pas aussi pur; mais avec un suffisant excès de ventilation, et le mouvement qui a toujours lieu dans les salles, l'air appelé serait assez bien distribué et pourrait être assez pur. Il y aurait dans tous les cas un immense avantage sur ce qui existe. Par cette disposition, il faudrait transporter le combustible dans les salles, et dans chaque salle, il y aurait un et quelquefois deux foyers à diriger. Mais l'avantage de n'avoir à diriger qu'un seul foyer, ou un seul pour le chauffage et un seul, voisin, pour la ventilation, et l'avantage de transporter la chaleur par la

vapeur ou l'eau chaude, coûtent cher, et tous les hôpitaux ne sont pas en état de les payer. La disposition que j'ai indiquée est d'ailleurs la seule qu'on puisse employer dans les petits établissements.

Mais quelle que soit la disposition adoptée pour un hôpital, grand ou petit, il faut déterminer les dimensions des différentes parties des appareils, les surfaces des foyers, les sections des tuyaux, les surfaces de chauffe, etc. Les éléments qui ne dépendent que des quantités de chaleur perdues par les vitres et les murailles peuvent se calculer, avec une suffisante approximation, par les formules qui seront données dans le second chapitre de cet ouvrage; mais pour les autres, il faut nécessairement connaître à quel chiffre la ventilation doit être portée, et à cet égard nous ne savons rien de bien positif.

Dans le mémoire sur le chauffage et la ventilation de l'amphithéâtre du Conservatoire, rapportée précédemment, M. Morin dit qu'il a constaté, par des expériences faites à l'hôpital Beaujon, *que la quantité d'air évacué variait de 40 à 60 mètres cubes d'air par malade et par heure et que cette ventilation était à peine suffisante quand il n'y avait pas de blessures trop graves*. Je ne doute pas le moins du monde de l'exactitude des expériences anémométriques, mais pour en tirer une conclusion qui porterait la ventilation de salubrité des hôpitaux à un chiffre aussi élevé, il aurait fallu reconnaître si la ventilation observée était réellement efficace, et s'il n'y avait pas dans la salle une cause permanente d'insalubrité. Si, par exemple, l'air de ventilation était à une température plus élevée que celle de la salle et si l'air s'échappait par la partie supérieure, il est évident, qu'à moins que l'air n'arrivât par un très-grand nombre d'orifices percés dans le plancher, le courant serait sans utilité pour assainir l'espace occupé par les malades, et qu'on pourrait produire une ventilation énorme presque sans résultats. Il en serait de même, si l'air de ventilation étant plus froid que celui de la salle, l'orifice de sortie était près du plancher. En admettant même que le courant d'air traversât l'espace occupé par les malades, si les murs, le plafond, les rideaux des lits, n'avaient pas été blanchis depuis longtemps, les matières animales, provenant des exhalaisons de toute espèce, qui y auraient été accumulées, formeraient un foyer permanent d'infection, qu'une ventilation même très-puissante ne ferait pas disparaître¹. M. Morin n'ayant donné aucun détail sur les circonstances dans lesquelles les expériences ont été faites, il faut espérer, dans l'intérêt de l'humanité, qu'elles ont eu lieu dans une ou plusieurs des circonstances défavorables que nous venons de signaler, et que l'assainissement des hôpitaux peut s'obtenir par une ventilation efficace beaucoup moins considérable, et par conséquent à beaucoup moins de frais. Ceci est une nouvelle preuve de l'insuffisance des expériences relatives à la ventilation totale, quand elles ne sont pas accompagnées de l'examen du mouvement de l'air

1. Un fait bien connu, fera comprendre l'exactitude de cette observation. Dans tous les lycées, dans toutes les grandes maisons d'éducation, les réfectoires ont une très-mauvaise odeur, qui ne se dissipe pas par la ventilation, car les fenêtres restent presque toujours ouvertes dans les intervalles des repas; elle provient des matières organiques déposées sur les murailles et sur le plafond, car elle disparaît complètement quand ces surfaces ont été peintes ou lavées. Je ne doute pas que l'odeur permanente des salles d'hôpitaux ne provienne de la même cause.

dans les lieux qui doivent être assainis, et des autres circonstances qui peuvent avoir de l'influence sur la salubrité.

J'aurais bien de la peine à croire que dans un hôpital bien dirigé, dont les salles ne sont pas trop grandes, quand les murs, les plafonds, les rideaux des lits sont souvent lavés, une ventilation réellement efficace de 30 mètres cubes, par lit et par heure, ne puisse pas suffire dans les cas les plus défavorables. Je pense pourtant, qu'il convient de construire les appareils de manière qu'ils puissent produire au besoin une ventilation de 40 mètres cubes, mais qu'ils doivent être pourvus de registres destinés à la réduire au chiffre indispensable à la dissipation de toute mauvaise odeur.

Salles d'écoles. L'assainissement des écoles primaires et des salles d'asile, par une ventilation convenable, est une chose d'une extrême importance et qui doit appeler toute la sollicitude des personnes qui, à différents titres, participent à la direction ou à la surveillance de ces établissements. En 1842, d'après les ordres du ministre de l'instruction publique, j'ai rédigé une instruction sur le chauffage et l'assainissement de ces établissements. Cette instruction renferme non-seulement la disposition des appareils, mais toutes les dimensions correspondantes à des salles contenant de 50 à 300 enfants; elle se trouve résumée dans le deuxième volume du *Traité de la chaleur*, page 456. Les dispositions sont les mêmes que celles que je viens d'indiquer pour les salles des petits hôpitaux. Pour la ventilation d'été, une machine mise en mouvement par la chute d'un poids, serait d'un usage très-commode.

Considérons, par exemple, une salle d'école renfermant 200 enfants; pour une ventilation de 6 mètres cubes par enfant et par heure, la ventilation devrait être de 1200 mètres cubes par heure, et par seconde de $1200 : 3600 = 0^m,33$, dont le poids est de $1,03 \cdot 1,3 = 0^k,43$. Si cet air se dégageait par un orifice ayant $0^m,25$ de section, la vitesse serait de $0^m,33 : 0,25 = 1^m,32$, et le travail $p \cdot v^2 : 2g$, de $0^{km},038$. Alors, si on admettait six heures de ventilation par jour, le travail total, indépendamment des frottements, serait de $0,038 \cdot 3600 \cdot 6 = 820^{km},8$. Supposons maintenant qu'un ouvrier agissant sur la manivelle d'un treuil élève un poids à une certaine hauteur, son travail par seconde sera d'environ 6^{km} , et pendant une heure, de $6^{km},3600 = 21\,600^{km}$, qui se reproduiront en grande partie par la chute du poids. Or, on peut facilement, à l'aide d'une machine semblable à un tourne-broche, effectuer la chute du poids en six heures, et par conséquent produire pendant cette durée, un travail uniforme, bien supérieur à celui qu'exige la ventilation, même en supposant qu'on n'utilise que 4 pour 100 du travail recueilli. Ce mode de ventilation permettant d'accumuler à peu de frais un grand excès de travail, il faudrait employer les machines les plus simples et les plus économiques pour transmettre le mouvement à l'air. Les ventilateurs à force centrifuge seraient trop embarrassants; on les remplacerait avec avantage par un axe vertical placé dans la cheminée, garni de 3 ou 4 plaques inclinées à 45 degrés, et qui recevrait un mouvement de rotation provenant de la chute du poids; l'appareil servirait lui-même de volant.

Lycées, maisons d'éducation. Dans ces établissements, les salles de classes et d'études sont en général chauffées par des poêles; mais ni ces salles, ni les dortoirs, ni les cabinets d'aisance ne sont ventilés, et pourtant il serait très-important qu'ils le fussent. Pour les

établissements dont il est question, je n'ai que peu de chose à ajouter à ce que j'ai dit dans le deuxième volume du *Traité de la chaleur*, page 450. Quand on ne peut pas faire la dépense qu'exigerait un système général de chauffage et de ventilation, ou que la disposition des lieux s'y oppose, et qu'on est obligé de chauffer chaque pièce séparément, il faut, dans chacune, employer la disposition que nous avons indiquée précédemment pour les salles des petits hôpitaux, page 88. Dans les dortoirs, plusieurs tuyaux aboutissant dans les plafonds et dans les combles produiraient, même sans foyers, une ventilation énergique en été et en hiver, par la différence de température de l'air intérieur et de l'air extérieur; mais il faudrait, que des orifices ayant des sections peu différentes de celles des tuyaux, permettent à l'air des corridors ou des escaliers de pénétrer dans les dortoirs; les effets de ces tuyaux seraient évidemment beaucoup plus grands si on les plaçait au-dessus des lampes destinées à éclairer les dortoirs pendant la nuit. Ce mode de ventilation, dont on ne peut pas calculer la puissance, même approximativement, serait remplacé avec un grand avantage, par une ventilation mécanique provenant de la chute d'un poids qui s'effectuerait pendant le séjour des enfants dans les dortoirs et qui produirait un effet constant. Ce dernier mode de ventilation s'appliquerait avec une grande facilité et une grande économie aux lieux d'aisance.

Amphithéâtres. Pour les grands amphithéâtres occupés par un grand nombre de personnes, le mode de ventilation le plus convenable consiste, comme je l'ai dit (*Traité de la chaleur*, t. II, p. 423), à distribuer uniformément l'air chaud ou l'air froid au-dessous des gradins, d'où il s'échappe par un très-grand nombre d'orifices égaux et uniformément répartis, percés devant ou derrière les bancs; de la salle, l'air s'écoule ensuite par des orifices percés dans le plafond. Par cette méthode, l'air respiré est toujours pur, et la totalité de l'air est employé utilement, lorsqu'il est uniformément distribué. Ce mouvement de l'air pourrait être produit par une cheminée d'appel dont la partie inférieure communiquerait avec les orifices percés dans le plafond, ou par un ventilateur qui refoulerait l'air sous les gradins. Pendant l'hiver la salle agirait aussi comme une puissante cheminée. Au premier abord, ces deux modes paraissent équivalents, mais il n'en est pas ainsi. Lorsque l'air est lancé, il est facile de le distribuer à peu près uniformément au-dessous des gradins par des tuyaux placés sous chacun d'eux et percés de trous dont le diamètre augmente à mesure qu'ils s'éloignent du tuyau distributeur; alors la forme et la position des orifices du plafond sont arbitraires, pourvu que la somme de leurs surfaces soit suffisante. Mais, quand le mouvement a lieu par appel, il faut non-seulement que l'air soit distribué à peu près uniformément sous les gradins, mais que les orifices d'appel du plafond agissent à peu près également sur tous les orifices de sortie, ce qui n'est pas chose facile à exécuter, attendu que l'effet d'un orifice d'appel varie rapidement avec la distance, à moins qu'elle ne soit très-grande. Ainsi il y aurait un grand avantage à employer une ventilation mécanique. Ce mode de ventilation a été employé dans la salle des séances de l'ancienne chambre des pairs, et il a très-bien réussi; mais, comme l'air était lancé par des ventilateurs mus par des hommes, placés loin de toute surveillance, la régularité de la ventilation n'était pas suffisamment assurée, et le système a été changé; en été, l'air est appelé par une cheminée, en hiver, la grande hauteur de la salle suffit.

Si, l'air chaud étant amené dans la salle, au delà de l'amphithéâtre, la ventilation avait lieu par une cheminée d'appel communiquant avec des orifices placés sous l'amphithéâtre, on ne pourrait obtenir l'uniformité dans la ventilation qu'autant que les orifices d'appel seraient disposés de manière à agir sensiblement de même sur tous les orifices percés dans les faces latérales des bancs, en supposant ces orifices égaux et uniformément répartis. Mais, indépendamment de la difficulté que présenterait l'exécution de cette condition, cette méthode aurait l'inconvénient d'amener devant chaque personne de l'air déjà vicié par la respiration, et d'autant plus qu'elle occuperait un banc plus élevé; et, en outre, d'accumuler au plafond de l'air échauffé et vicié, qui serait surtout nuisible aux personnes qui occuperaient les derniers bancs. A la vérité, on pourrait placer un ou plusieurs orifices d'appel dans le plafond, mais on ne saurait pas dans quelle proportion les orifices d'en haut et d'en bas concourraient à l'assainissement, et sur certains points ils se contrarieraient.

Quoique la ventilation d'un amphithéâtre par des orifices d'appel placés au-dessous des gradins ait de graves inconvénients, elle est toujours très-utile, surtout si les trous percés dans les bancs sont disposés de manière à produire une ventilation à peu près uniforme, et si les bancs ne s'élèvent pas à une grande hauteur, ou si les derniers bancs sont rarement occupés. Mais, quand les amphithéâtres sont très-vastes, quand les gradins s'élèvent près du plafond, qu'ils sont souvent remplis, longtemps occupés, une ventilation mécanique par ascension, puissante, et uniformément répartie, est la seule méthode qui puisse satisfaire à toutes les conditions de salubrité; malheureusement, les dépenses de premier établissement sont plus considérables que dans la disposition généralement employée.

Dans tous les modes possibles de ventilation d'un amphithéâtre, la ventilation doit être calculée sur le nombre des places et doit rester constante, quel que soit le nombre des personnes réunies. Mais la température de l'air chaud, à son entrée dans la salle, doit être d'autant moins élevée que la salle renferme un plus grand nombre de personnes, car chacune produit autant de chaleur qu'une bougie et à peu près 40 unités de chaleur employée à chauffer l'air environnant; pour une ventilation de 10 mètres cubes, par personne et par heure, cette chaleur seule échaufferait l'air de 13 degrés. Ainsi les appareils destinés au chauffage de l'air doivent être disposés de manière que le même volume d'air puisse prendre, dans un temps assez court, des températures très-différentes. Avec des calorifères dont les surfaces sont chauffées par la fumée, on parvient facilement à remplir cette condition en faisant varier l'activité du foyer; avec des calorifères à vapeur, en diminuant le volume de vapeur qui passe dans les tuyaux de chauffage; mais avec des calorifères à eau chaude, à cause du grand volume d'eau en circulation, et par suite de la grande quantité de chaleur qu'ils renferment, la température de l'air ne pourrait éprouver de changements notables qu'après un temps très-long; par conséquent, l'appareil, pour satisfaire à la condition dont il est question, devrait être disposé de manière à permettre de varier l'étendue des surfaces que l'air parcourt pour s'échauffer, ce qui ne serait pas facile à exécuter.

Prisons. Le principe de l'assainissement des prisons cellulaires par une ventilation convenable est maintenant admis et hors de discussion. Pour ces prisons, je pense que le

mode de chauffage établi dans la prison Mazas est encore celui qu'il faudrait préférer. Quant à l'assainissement des cellules, il y a maintenant deux méthodes, celle qui est employée à Mazas et celle qui, depuis près de deux ans, est essayée dans une cellule de la prison de Tours. Celle de la prison Mazas consiste, comme nous l'avons vu, à faire sortir l'air de chaque cellule par le tuyau de descente qui termine la cuvette; cette méthode est très-simple, elle a l'avantage de n'exiger aucun soin du détenu, et la communication du son d'une cellule à une autre peut être exactement interceptée; mais elle a l'inconvénient de faire varier la ventilation par un engorgement partiel du tuyau de descente, et celui de verser dans l'atmosphère un grand volume d'air complètement saturé des émanations des fosses. Le système proposé par M. Sagey, et qui va être appliqué à toutes les cellules de la prison de Tours, consiste, comme nous l'avons dit (page 31), dans des cuvettes à double enveloppe, fermées par un bouchon mobile, dans lesquelles l'air de ventilation pénètre comme dans celles de Mazas, mais d'où il se dégage par un canal latéral. Cette dernière méthode a l'inconvénient d'exiger un peu de soin de la part des détenus, mais elle a le grand avantage de permettre une ventilation uniforme, et de ne verser dans l'atmosphère que de l'air très-peu altéré.

Quant au mode même de ventilation, on peut choisir entre une ventilation mécanique et une cheminée d'appel. Je pense que, dans tous les cas, une ventilation mécanique est préférable. Pour les grandes prisons destinées à des prévenus, et où l'on ne peut pas employer le travail des détenus, il faudrait se servir d'une petite machine à vapeur à détente, sans condensation, dont le travail ne coûterait rien en hiver. Pour celles qui ne renferment que des condamnés, il faudrait employer le travail de quelques-uns, dans le jour, pour faire mouvoir un ventilateur qui produirait l'assainissement des cellules, et, en outre, pour faire monter un poids ou de l'eau dont la chute, pendant la nuit, continuerait la ventilation. Une disposition qui serait très-commode consisterait à élever de l'eau qui, dans sa chute, appellerait l'air par une trompe.

Supposons, par exemple, 400 détenus; en admettant une ventilation de 10 mètres par individu et par heure, ce serait, par seconde, $4000 : 3600 = 1^m,11$; en supposant que cet air s'écoule par une cheminée avec une vitesse de 3 mètres, le travail serait $p\nu^2 : 2g = 1.11,1,3.9 : 19,62 = 0^km,66$; pour 10 heures, il sera $0,66.10.3600 = 23760^km$, tandis que le travail d'un homme en 1 heure est de $6.3600 = 21600$, et en 10 heures de 216 000; en admettant que les frottements de toute espèce réduisent ce travail à 0,1, on voit que le travail d'un seul homme pendant 10 heures pourra produire facilement le travail nécessaire à la ventilation de nuit. Si le travail était employé à élever un poids à une hauteur de 20 mètres, ce poids serait de 10800 kilogrammes.

J'ai supposé dans ce qui précède que l'air était appelé ou par une cheminée ou par une machine, mais on pourrait l'introduire dans les cellules par compression. Il faudrait alors se servir de la disposition de M. Sagey pour les cuvettes; les gaz s'échapperaient dans l'air par une grande cheminée qui partirait des combles, et dans laquelle aboutiraient les tuyaux d'écoulement de toutes les cellules; mais cette disposition aurait le grand inconvénient de rejeter dans le corridor, par les fissures de la porte, une partie de l'air vicié des cellules.

Relativement aux maisons centrales dans lesquelles les détenus vivent en commun, les opinions sont partagées. Quelques personnes pensent, qu'il serait dangereux de placer les détenus dans des conditions sanitaires meilleures que celles où se trouvent souvent les ouvriers honnêtes qui travaillent dans les ateliers de l'industrie; et en général, d'améliorer le régime des prisons, parce que ces améliorations diminueraient la gravité de la peine, aux yeux des hommes dépravés qui ne sont retenus que par la crainte du châtement. D'autres sont d'avis, que la privation de la liberté, le travail forcé, une mauvaise nourriture, souvent même insuffisante, et la sévérité de la discipline, constituent une peine assez grave par elle-même pour permettre, sans inconvénient, les améliorations relatives à la salubrité. Je partage cette dernière opinion, d'autant plus que les gardiens et toutes les personnes attachées à l'administration souffrent plus ou moins de l'insalubrité de la prison.

Ainsi, je pense que, dans les maisons centrales, les dortoirs, les ateliers, les infirmeries, les lieux d'aisance, doivent être assainis par une ventilation puissante; mais qu'elle doit être obtenue, pendant le jour, par le travail régulier d'un certain nombre de détenus employés à faire mouvoir des ventilateurs, et dans les dortoirs, pendant la nuit, par un travail accumulé pendant le jour. Ces améliorations exigeraient fort peu de dépense, parce que les ventilateurs pourraient être en bois, et que, dans certaines prisons, ils pourraient être construits par les détenus eux-mêmes¹.

Remarques sur la ventilation d'hiver par la chaleur de la fumée des calorifères. Pour employer cette chaleur, la fumée devrait s'écouler par une cheminée en tôle de 4 à 5 mètres de hauteur, qui serait placée dans la cheminée de ventilation, mais le tuyau qui amènerait l'air dans la cheminée devrait être pourvu d'un registre et d'un anémomètre fixe pour régler la ventilation. Au commencement et à la fin de la saison, l'anémomètre servirait aussi à diriger le foyer quand l'appel provenant de la chaleur perdue serait insuffisant. La section de la cheminée ayant été calculée de manière que l'excès de la tempé-

1. Il y a quelques années, je visitai la maison centrale de Nîmes, accompagné de M. Boileau de Castelneau, chirurgien de cette prison. Dans toutes les parties de la maison, dortoirs, ateliers, infirmerie, l'air y était vicié, et on y éprouvait une sensation extrêmement pénible. Mais mon attention se fixa principalement sur deux ateliers; dans l'un on peignait de la laine, et il y avait dans la pièce une douzaine de petits foyers à charbon de bois découverts; dans l'autre, les détenus étaient employés à peigner des déchets de soie; l'air y était tellement chargé de poussière de soie, qu'on apercevait à peine les objets à quelques mètres. Ces deux ateliers étaient extrêmement insalubres; aussi d'après les nombreuses observations de l'habile chirurgien qui me conduisait, la mortalité y était très-grande, et excédait de beaucoup celle des autres ateliers. La nécessité de l'amélioration de ces ateliers était évidente, et le moyen d'y parvenir était très-simple; il consistait à placer dans chacun d'eux un ventilateur à force centrifuge; la dépense aurait été très-faible parce que l'on aurait pu les construire en bois, et que le travail nécessaire pour les maintenir en mouvement n'aurait rien coûté, parce que ce travail aurait été fait par les détenus. M. Boileau de Castelneau comprit très-bien l'efficacité du remède que je proposais; la demande en fut faite au directeur, au préfet, aux inspecteurs généraux des prisons, au ministre de l'intérieur, elle a été renouvelée depuis, dans les rapports que les médecins sont tenus d'adresser chaque année au ministre de l'intérieur, mais sans succès, et les choses sont encore dans le même état. M. Boileau de Castelneau a publié, dans les *Annales d'hygiène*, plusieurs mémoires d'un grand intérêt relatifs à l'influence de la nourriture, du travail, et de l'insalubrité des ateliers, sur la durée moyenne de la vie des détenus.

rature fût de 30 degrés, si le calorifère abandonnait la fumée à 300 degrés, on trouve que la cheminée pourrait appeler un volume d'air égal à peu près à 200 mètres cubes par kilogramme de houille brûlée dans le calorifère; mais, quand les surfaces des calorifères sont assez étendues, la température de la fumée est beaucoup moins élevée; d'ailleurs, pour ceux qui sont à vapeur ou à eau chaude, on refroidit toujours la fumée à sa sortie en la faisant passer dans des tuyaux placés dans des canaux qui sont parcourus par de l'air extérieur; ainsi, dans des appareils bien disposés, l'appel par la chaleur perdue est beaucoup plus petit que nous l'avons supposé. Il est très-important de remarquer, que le mode d'appel dont il est question, sans anémomètre fixe et sans registre, comme on l'a employé jusqu'ici, produit des effets très-variables, quelquefois beaucoup trop grands, d'autres fois trop faibles, et qu'on ne sait jamais ce qu'on fait, tandis qu'il est de la plus haute importance de le savoir toujours.

Causes de la lenteur des progrès de l'industrie du chauffage et de l'assainissement des lieux habités. On comprend tous les jours davantage la nécessité du chauffage et de l'assainissement des habitations particulières et des édifices publics. Aussi, depuis quelques années, un grand nombre d'édifices publics ont été chauffés et ventilés; mais l'industrie du chauffage et de la ventilation fait réellement peu de progrès. Les causes en sont nombreuses.

Les phénomènes généraux qui se produisent dans le chauffage et la ventilation paraissent fort simples, car ils se réduisent à la transmission de la chaleur à travers les corps, et aux mouvements de l'air produit par la chaleur ou des machines, qui ne reposent que sur les lois les plus élémentaires de la physique et de la mécanique. Il semble, que les seules choses difficiles, mais qui sont entièrement du ressort des ingénieurs, consistent dans le choix des dispositions, dans la détermination des formes et des dimensions des appareils destinés à produire un effet donné, et enfin, dans les moyens de régulariser le chauffage et la ventilation. Mais les choses ne sont pas aussi simples qu'elles le paraissent au premier abord, et pour juger un projet ou un appareil fonctionnant, des notions générales ne suffisent pas, il faut avoir étudié sérieusement les questions qui s'y rapportent. Aussi, on ne rencontre souvent, chez les personnes qui sont appelées à donner leur avis sur des projets ou des appareils construits, que des idées vagues, incomplètes et même parfois erronées.

Quelquefois les projets de chauffage et de ventilation sont mis au concours; mais le plus souvent les travaux sont concédés directement à des entrepreneurs favorisés. Par ce dernier mode de concession, on supprime la concurrence, et par suite on arrête tout progrès, toute amélioration dans la disposition des appareils, toute économie dans les dépenses premières et dans les frais journaliers.

Enfin, une dernière circonstance qui a une très-grande influence sur la lenteur des progrès de l'industrie dont il est question, c'est la manière dont se font les expériences de réception, quand toutefois il s'en fait. On se contente souvent de quelques expériences sur la ventilation totale, pour lesquelles tout avait été disposé, mais qui ne donnent aucune garantie, que l'appareil a une puissance suffisante pour les circonstances atmosphériques les plus défavorables, que le chauffeur a un moyen assuré pour diriger son foyer de manière à obtenir toujours le même effet, que cet effet est toujours réalisé, que toute

la ventilation est réellement efficace pour l'assainissement, et enfin, que la ventilation est uniformément répartie dans l'espace occupé. Des expériences sur la ventilation totale, un certain jour, à une certaine heure, sans aucun autre renseignement, comme cela arrive le plus souvent, ne prouvent réellement que le fait même qu'elles constatent, et ne peuvent servir qu'à induire en erreur les personnes qui ne comprennent pas combien elles sont insuffisantes pour porter un jugement sur l'appareil.

Il serait bien à désirer qu'à l'avenir : 1° la construction des appareils de chauffage et de ventilation des édifices publics, ne fût accordée à un constructeur, qu'à la suite d'un concours devant une commission composée de personnes compétentes ; 2° que les rouages administratifs qui séparent la décision de la commission de l'exécution, fussent simplifiés, et surtout que cette décision eût plus d'autorité que par le passé ; 3° que l'examen des appareils, après leur construction, fût prolongé pendant un temps suffisant, pour constater la puissance des appareils de chauffage dans les circonstances les plus défavorables, celles des appareils de ventilation, la régularité de la ventilation totale, l'uniformité de sa distribution, l'exactitude des instruments destinés à indiquer à chaque instant l'état de la ventilation, les consommations de combustible, etc. ; 4° que les rapports de ces deux commissions fussent publiés.

Ces mesures rassureraient complètement les administrations sur les effets des appareils, et l'industrie du chauffage et de la ventilation ferait de rapides progrès. Les ingénieurs capables ne pourraient qu'y gagner, car il n'y a point de secrets dans les appareils de chauffage, les expériences profiteraient à tous, et les inventions de chacun, protégées par des brevets, seraient parfaitement respectées.

CHAPITRE II.

FORMULES USUELLES RELATIVES AU REFROIDISSEMENT ET A LA TRANSMISSION DE LA CHALEUR.

Dans la seconde édition du *Traité de la chaleur*, j'ai donné des nombres et des formules pour calculer le refroidissement des corps et la transmission de la chaleur à travers les corps mauvais conducteurs ; mais ces nombres et ces formules résultaient d'expériences faites sur une trop petite échelle, trop peu variées, et dans des limites de températures trop restreintes. Depuis, j'ai repris ces expériences dans de meilleures conditions ; pour le refroidissement, en employant des vases de formes très-différentes, renfermant de grands volumes d'eau, et en observant les variations de température dans des limites plus étendues ; pour la transmission de la chaleur, en employant des méthodes différentes et plus exactes.

Dans ce chapitre, je donnerai les formules usuelles, avec les nombres qui résultent des expériences qui seront décrites dans le chapitre suivant.

§ 1. FORMULES USUELLES RELATIVES AU REFROIDISSEMENT.

1. Le refroidissement d'un corps, dans les circonstances ordinaires, a lieu par le rayonnement et par le contact de l'air, de sorte que, si on désigne par M le refroidissement total du corps pendant un certain temps, par R et A les parties du refroidissement dues au rayonnement et au contact de l'air, on a :

$$M = R + A \quad [1].$$

2. *Refroidissement dû au rayonnement.* La quantité de chaleur perdue par le rayonnement, par unité de surface et pour l'unité de temps, pour un corps dont la température resté constante, est indépendante de la forme et de la grandeur du corps, pourvu

que sa surface n'ait pas de parties rentrantes ; elle ne dépend que de la nature de la surface du corps, de l'excès de sa température sur celle de l'enceinte, et de la valeur absolue de cette dernière.

3. Lorsque le corps est placé dans une enceinte dont la surface est terne, ce qui a toujours lieu, excepté dans des recherches de laboratoire, pour des excès de température compris entre 25° et 65°, et pour une température de l'enceinte égale à 12 degrés, la quantité de chaleur R émise, par mètre carré et par heure, est représentée par la formule

$$R = Kt(1 + 0,0056t) \quad [2].$$

Dans cette formule, K représente un nombre constant qui dépend de la nature de la surface du corps, et t , l'excès constant de la température du corps sur celle de l'enceinte.

4. Pour des températures t' de l'enceinte qui ne différeraient de 12° que de quelques unités, il faudrait remplacer K par $K(1 + 0,0037 \cdot (t' - 12))$.

VALEURS DE K POUR DIFFÉRENTES MATIÈRES.

Argent poli.	0,13	Poussière de bois.	3,53
Papier argenté.	0,42	Charbon en poudre	3,42
Laiton poli.	0,24	Sable fin.	3,62
Papier doré.	0,23	Peinture à l'huile.	3,71
Cuivre rouge	0,16	Papier	3,77
Zinc.	0,24	Noir de fumée.	4,01
Étain.	0,215	Pierre à bâtir.	3,60
Tôle polie	0,45	Plâtre.	3,60
Tôle plombée	0,65	Bois	3,60
Tôle ordinaire.	2,77	Étoffes de laine	3,68
Tôle oxydée	3,36	Calicot	3,65
Fonte neuve.	3,17	Étoffes de soie.	3,71
Fonte oxydée	3,36	Eau	5,31
Verre.	2,91	Huile.	7,24
Craie en poudre.	3,32		

5. Pour le papier et les étoffes la couleur est sans influence.

6. D'après Dulong, le refroidissement dû au rayonnement est représenté par la formule

$$R = ma^\theta (a^t - 1) \quad [3],$$

dans laquelle θ représente la température de l'enceinte, t l'excès de température du corps sur celle de l'enceinte, a un nombre constant égal à 1,0077, et m un nombre constant qui dépend de la nature de la surface du corps rayonnant. Cette formule a été vérifiée par Dulong pour des excès de température qui se sont élevés jusqu'à 260 degrés. Dans

toutes mes expériences, je l'ai trouvée parfaitement exacte, et j'ai reconnu que la valeur de m était représentée par la formule, $m = 124,72 K$ [4].

7. Ainsi, quand la température de l'enceinte différera notablement de 12 degrés, et quand l'excès de température ne sera pas compris entre 25 degrés et 65 degrés, il faudra employer les formules [3] et [4].

8. Le tableau suivant renferme les quantités de chaleur émises par rayonnement, par mètre carré et par heure, pour différents excès de température en supposant l'enceinte à 15 degrés, température ordinaire des lieux échauffés. Si cette température était de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 degrés, les nombres du tableau devraient être multipliés par 0,89; 0,96; 1,04; 1,12; 1,21; 1,31; 1,41; 1,52; 1,65; 1,78; 1,92.

EXCÈS de température.	VALEURS DE R.	EXCÈS de température.	VALEURS DE R.	EXCÈS de température.	VALEURS DE R.
10 ⁰	11,2 . K	90 ⁰	138,7 . K	170 ⁰	377,4 . K
20	23,2 . K	100	161,3 . K	180	418,5 . K
30	36,1 . K	110	183,3 . K	190	463,2 . K
40	50,1 . K	120	211,3 . K	200	511,2 . K
50	65,3 . K	130	239,3 . K	210	563,1 . K
60	81,7 . K	140	269,5 . K	220	619,0 . K
70	99,3 . K	150	302,1 . K	230	679,5 . K
80	118,5 . K	160	339,0 . K	240	744,8 . K

9. *Refroidissement dû au contact de l'air.* Le refroidissement dû au contact de l'air est indépendant de la nature de la surface du corps et de la température de l'enceinte; il ne dépend que de l'excès de la température du corps sur celle de l'enceinte, de la forme et des dimensions du corps.

10. Dans tous les cas, pour des excès de température compris entre 25 et 65 degrés, la quantité A de chaleur perdue par mètre carré et par heure est représentée par la formule

$$A = K't (1 + 0,0073 t) \quad [5],$$

dans laquelle t représente l'excès constant de la température du corps sur celle l'enceinte, et K' un nombre qui varie avec la forme et les dimensions du corps.

11. Pour les corps sphériques on a

$$K' = 1,778 + \frac{0,13}{r} \quad [6],$$

r représente le rayon de la sphère. En prenant successivement pour r , 0^m,05 ; 0^m,10 ; 0^m,20 ; 0^m,40 ; 0^m,80, on trouve pour K' les valeurs suivantes : 4,38 ; 3,08 ; 2,43 ; 2,10 ; 1,94.

12. Pour des cylindres horizontaux on a

$$K' = 2,058 + \frac{0,0382}{r} \quad [7],$$

r , représente le rayon du cylindre. En prenant successivement pour r , 0^m,05 ; 0^m,10 ; 0^m,15 ; 0^m,20 ; 0^m,25 ; 0^m,30 ; 0^m,40 ; on trouve pour les valeurs de K' , 2,82 ; 2,44 ; 2,30 ; 2,25 ; 2,21 ; 2,18 ; 2,15.

13. Pour les cylindres verticaux, le refroidissement dépend à la fois de leur hauteur et de leur diamètre, et la valeur de K' est donnée par l'équation

$$K' = \left\{ 0,726 + \frac{0,0345}{\sqrt{r}} \right\} \left\{ 2,43 + \frac{0,8758}{\sqrt{h}} \right\} \quad [8].$$

Dans cette formule r est le rayon du cylindre et h sa hauteur.

14. Le tableau suivant renferme les valeurs de K' pour un certain nombre de hauteurs et de diamètres.

HAUTEURS des cylindres.	0 ^m ,50	1 ^m ,0	2 ^m ,0	3 ^m ,0	4 ^m ,0	5 ^m ,0	10 ^m ,0
RAYONS des cylindres.							
0 ^m ,025	3,55	3,20	2,95	2,84	2,79	2,73	2,62
0 ^m ,05	3,22	2,90	2,68	2,57	2,52	2,48	2,38
0 ^m ,10	3,05	2,75	2,54	2,44	2,39	2,35	2,26
0 ^m ,20	2,93	2,65	2,45	2,35	2,30	2,26	2,17
0 ^m ,30	2,88	2,60	2,40	2,31	2,26	2,22	2,13
0 ^m ,40	2,85	2,57	2,37	2,28	2,23	2,20	2,11
0 ^m ,50	2,83	2,55	2,36	2,26	2,22	2,18	2,09

15. Pour les surfaces planes et verticales, la valeur de K' est donnée par l'équation suivante

$$K' = 1,764 + \frac{0,636}{\sqrt{h}} \quad [9].$$

16. En prenant pour h , $0^m, 10$; $0^m, 20$; $0^m, 30$; $0^m, 40$; $0^m, 50$; $0^m, 60$; $1^m, 0$; $2^m, 0$; $10^m, 20^m$; on trouve pour K' , 3,848; 3,186; 2,926; 2,770; 2,660; 2,585; 2,400; 2,21; 1,96; 1,90.

17. Dulong a donné pour la vitesse du refroidissement dû au contact de l'air la formule

$$A = mt^{1,233} \quad [10],$$

dans laquelle t représente l'excès de température du corps. Cette formule, comme celle qui est relative au rayonnement, s'accorde parfaitement avec mes expériences, en faisant $m=0,552K'$. Comme cette formule a été vérifiée pour de très-grands excès de température, il faudra l'employer toutes les fois que l'excès de température dépassera 65 degrés.

18. Le tableau suivant renferme les quantités de chaleur perdues par le contact de l'air par mètre carré et par heure pour différents excès de température, d'après la formule de Dulong.

EXCÈS de température.	VALEURS DE A.	EXCÈS de température.	VALEURS DE A.	EXCÈS de température.	VALEURS DE A.
10°	9,4 . K'	90°	141,7 . K'	170°	310,5 . K'
20	22,2 . K'	100	161,5 . K'	180	333,2 . K'
30	36,6 . K'	110	181,5 . K'	190	356,1 . K'
40	52,2 . K'	120	202,1 . K'	200	379,4 . K'
50	68,6 . K'	130	223,1 . K'	210	402,9 . K'
60	86,0 . K'	140	244,4 . K'	220	426,7 . K'
70	104,0 . K'	150	266,1 . K'	230	450,7 . K'
80	122,6 . K'	160	288,1 . K'	240	475,0 . K'

19. En résumant ce que nous venons de dire, quand l'excès de température sera compris entre 25 et 65 degrés et que la température de l'enceinte différera peu de 12 degrés, la quantité totale de la chaleur perdue s'obtiendra par la formule

$$M=R+A=Kt(1+0,0056t)+K't(1+0,0073t),$$

ou, à très-peu près, pour les corps terminés par des surfaces ternes, par la formule plus simple

$$M=(K+K')t(1+0,0065t) \quad [11].$$

20. Mais, dans toutes les autres circonstances, il faudra se servir de la formule

$$M=R+A=ma^6(a^t-1)+m't^{1,233} \quad [12],$$

dans laquelle $a=1,0077$; $m=124,72\text{ K}$; $m'=0,552\text{ K}'$; K et K' ayant les valeurs que nous avons indiquées précédemment.

21. Comme, dans les appareils ordinaires du chauffage, la température de l'enceinte diffère peu de 15 degrés, on pourra se servir des deux tableaux qui donnent de 10 en 10 degrés les vitesses du refroidissement, en supposant que, pour les excès intermédiaires, les vitesses sont proportionnelles aux excès; cette approximation sera bien suffisante dans tous les cas qui peuvent se présenter, d'autant plus que la moindre agitation de l'air change beaucoup la vitesse du refroidissement dû à l'air.

Nous appliquerons ces formules à un cas qui se présente fréquemment, celui des tuyaux en fonte horizontaux chauffés par la vapeur, la température de l'enceinte étant à 15 degrés.

$$\text{pour } r=0,05. M=128,6.3,36+132,15.3,07=837,8,$$

$$\text{pour } r=0,10. M=128,6.3,36+132,15.2,53=766,4,$$

$$\text{pour } r=0,15. M=128,6.3,36+132,15.2,15=716,2.$$

Les quantités de vapeurs condensées correspondantes sont, $1^k,58$; $1^k,44$; $1^k,35$. Ces nombres sont un peu plus petits que ceux qui résultent des observations directes; la différence provient, sans aucun doute, de l'eau entraînée mécaniquement par la vapeur.

22. *Observations sur les enveloppes multiples.* Nous avons trouvé, page 346 du deuxième volume du *Traité de la chaleur*, qu'en admettant la loi de Newton pour le refroidissement, en représentant par S, S', S'' , etc., la surface du corps et celles des enveloppes, par t l'excès de la température du corps sur celle de l'air, et par Q la valeur de $K+K'$, on avait pour trois enveloppes

$$M = Qt \cdot \frac{S \cdot S' \cdot S'' \cdot S'''}{SS'S'' + SS''S''' + SS'S'''} \quad [13],$$

et que s'il y avait n surfaces enveloppantes, le facteur fractionnaire de la valeur de M , aurait pour numérateur le produit des $n+1$ surfaces, et pour dénominateur la somme des produits de ces $n+1$ surfaces combinées n à n . Il résulte de là, que si les surfaces étaient assez rapprochées pour que leurs étendues fussent peu différentes, on aurait

$$M = Qt \cdot \frac{S}{n+1} \quad [14].$$

23. J'ai dit que des expériences faites avec deux ou trois enveloppes ont donné des résultats qui s'accordent d'une manière assez satisfaisante avec la première formule. J'ajouterai que pour cela, il est nécessaire que les surfaces soient assez éloignées les unes des autres pour que l'air se meuve facilement dans l'espace qui les sépare. Quand elles sont très-rapprochées, la vitesse du refroidissement décroît avec leur nombre suivant une loi beaucoup moins rapide. C'est un résultat tout à fait opposé à celui qu'on devait attendre, parce qu'il semble que l'air étant gêné dans ses mouvements, la transmission de la chaleur d'une enveloppe à la suivante est uniquement due au rayonnement; mais il y a une transmission directe par l'air immobile dont il faut tenir compte.

24. Lorsque les enveloppes sont très-rapprochées, le refroidissement est représenté par la formule

$$M = (K_1 + K')(t - t'') \left\{ \frac{K + \frac{C}{e}}{K + \frac{C}{e} + m(K_1 + K')} \right\} \quad [15],$$

dans laquelle K représente le rayonnement des surfaces intérieures, K_1 celui de la surface extérieure, K' le refroidissement de cette surface par l'air, C la conductibilité de l'air, e l'épaisseur des lames d'air et m le nombre des enveloppes⁴.

En supposant $K=K_1=3,77$; $K'=3,85$; $C=0,040$, et $e=0^m,001$; pour $m=0$, $m=1$, $m=2$, $m=3$, $m=4$; on trouve que les valeurs de M sont dans le rapport des nombres, 1; 0,87; 0,77; 0,69; 0,62. Des expériences directes ont donné, 1; 0,90; 0,75; 0,67; 0,60.

Si on avait fait le vide entre les enveloppes, la transmission de la chaleur n'aurait lieu que par le rayonnement, et la quantité de chaleur transmise se déduirait évidemment de la formule [15] en y faisant $C = 0$. Elle devient alors

$$M = \frac{(K_1 + K')(t - t'')K}{K + m(K + K')} \quad [16].$$

En supposant que les enveloppes soient formées de papier doré, on aurait $K = K_1 = 0,24$; en les supposant au nombre de 10, et en prenant $K' = 4$, $t = 100$, $t' = 15$, on trouve $M = 2,11$. Pour comparer cette transmission à celle qui aurait lieu si l'intervalle qui sépare le corps de la dernière enveloppe était occupé par de l'édrédon, corps le plus mauvais conducteur, supposons que l'intervalle soit de $0^m,01$; la formule de la transmission de la chaleur à travers une plaque étant, $CQ(t - t') : (C + Qe)$, dans laquelle C est la conductibilité de la matière, qui pour l'édrédon $= 0,036$, Q la perte de chaleur par la surface extérieure qui est ici $4,24$, et e l'épaisseur que nous avons supposée de $0^m,01$.

1. Dans le cas dont il s'agit en supposant une seule enveloppe, et en désignant par t et t' les températures des deux surfaces, on a

$$M = (t - t') \left(K + \frac{C}{e} \right), \quad \text{d'où} \quad M = (K_1 + K')(t - t'') \left\{ \frac{K + \frac{C}{e}}{K + \frac{C}{e} + (K_1 + K')} \right\}.$$

En supposant deux enveloppes et en désignant par θ la température de la seconde surface, on a

$$\begin{aligned} M &= (t - \theta) \left(K + \frac{C}{e} \right) \\ M &= (\theta - t') \left(K + \frac{C}{e} \right) \\ M &= (t' - t'') (K_1 + K') \end{aligned} \quad \text{d'où} \quad M = (K_1 + K')(t - t'') \left\{ \frac{K + \frac{C}{e}}{K + \frac{C}{e} + 2(K_1 + K')} \right\}.$$

En augmentant successivement d'une unité le nombre des enveloppes, on trouve que le coefficient de $(K_1 + K')$, au dénominateur de la fraction, augmente successivement de 1, et on est conduit à la formule [15].

Pour ces différentes valeurs numériques on trouve, que la quantité de chaleur transmise est égale à 185; ainsi la quantité de chaleur transmise est à peu près 90 fois plus grande qu'avec les enveloppes et le vide.

Le moyen que je viens d'indiquer pour diminuer la transmission de la chaleur est le plus efficace que je connaisse. Pour l'appliquer à deux cylindres métalliques concentriques, il faudrait fermer aux deux bouts l'intervalle qui les sépare par un corps mauvais conducteur, après y avoir introduit des feuilles de papier cuivrées formant une spirale très-serrée, puis souder près d'une des extrémités un très-petit tuyau de plomb qui servirait à faire le vide et que l'on fermerait ensuite en les comprimant et soudant son extrémité à la flamme d'un chalumeau. Cette disposition serait surtout avantageuse pour les appareils servant à faire de la glace.

25. *Chaleur transmise par un tuyau renfermé dans un canal parcouru par l'air.* Dans ce cas, qui se rencontre fréquemment, le rayonnement du cylindre échauffé la surface intérieure du canal, et l'air s'échauffe par son contact avec le cylindre et la surface du canal. Il est facile de voir que la section du canal n'aura que peu ou point d'influence, parce que la température de sa surface diminuera à mesure que le contour de sa section augmentera. Il résulte d'expériences faites sur une grande échelle, que la quantité de chaleur perdue par le cylindre est sensiblement la même que celle que le tuyau perdrait à l'air libre, par le contact de l'air, en prenant pour t , l'excès de la température du tuyau sur la température moyenne de l'air qui parcourt le canal.

26. *Transmission de la chaleur par un tuyau dont la surface est maintenue à une température constante, et qui est parcouru par l'air.* Cette circonstance se présente dans un grand nombre de calorifères à air chaud; ici le refroidissement par rayonnement disparaît complètement, et on peut admettre, sans erreur sensible, que la quantité de chaleur transmise est égale à celle qui passerait dans l'air si le tuyau était exposé à l'air libre; mais, dans ce cas comme dans le précédent, il faut prendre pour t , dans l'emploi des formules, l'excès de la température du cylindre sur la température moyenne de l'air à l'entrée et à la sortie.

§ 2. FORMULES RELATIVES A LA TRANSMISSION DE LA CHALEUR A TRAVERS LES CORPS.

27. *Corps terminés par des surfaces planes et parallèles.* Lorsque les surfaces d'une plaque homogène, dont l'épaisseur est e , sont maintenues à des températures constantes t et t' , toutes les surfaces parallèles intérieures ont aussi une température constante, du moins après un certain temps, quand le régime est établi. Dans cet état, on admet que la quantité de chaleur qui traverse chaque tranche élémentaire est proportionnelle à la différence de température dt de ses deux faces et en raison inverse de son épaisseur de , c'est-à-dire qu'elle est égale à $Cdt : de$; mais $t' - t = mdt$, et $e = mde$, par conséquent $Cdt : de = C(t - t') : e$; cette expression représente aussi la quantité de chaleur qui

traverse la plaque, parce que cette dernière est égale à celle qui, dans le même temps, passe a travers chaque tranche élémentaire. Ainsi, en désignant par M la quantité de chaleur qui traverse la plaque, par mètre carré et par heure, on

$$M = \frac{C(t - t')}{e} = (t - t') : \frac{e}{C} \quad [17].$$

Dans cette expression, C représente la valeur de M pour $t - t' = 1$, et pour $e = 1$, c'est-à-dire la conductibilité de la matière.

28. Si le corps était formé de deux plaques superposées, ayant des épaisseurs e, e' , et des conductibilités C et C', en désignant par θ la température commune des faces en contact, on aurait évidemment, quand le régime sera établi :

$$M = \frac{C(t - \theta)}{e}; \quad \text{et} \quad M = \frac{C'(\theta - t')}{e'}.$$

En éliminant θ entre ces deux équations on trouve :

$$M = (t - t') : \left(\frac{e}{C} + \frac{e'}{C'} \right) \quad [18].$$

29. On trouverait de même, pour un nombre quelconque de plaques :

$$M = (t - t') : \left(\frac{e}{C} + \frac{e'}{C'} + \frac{e''}{C''} + \frac{e'''}{C'''} + \dots \right) \quad [19].$$

50. Voici maintenant les valeurs de C pour un certain nombre de corps. Ces nombres représentent les quantités de chaleur qui traverseraient dans une heure une plaque de la matière ayant 1 mètre carré de surface, 1 mètre d'épaisseur, les deux surfaces ayant des températures qui diffèrent de 1 degré.

MATIÈRES CONTINUES, OU DONT LES PARTIES SONT AGGLOMÉRÉES.

Cuivre.		C = 64,00
Fer.		C = 29,00
Zinc		C = 28,00
Plomb.		C = 14,00
Charbon des cornues à gaz.	<i>d</i> 1,61	C = 4,96
Marbre gris à grains fins.	<i>d</i> = 2,68	C = 3,48
Marbre blanc saccharoïde à gros grains.	<i>d</i> = 2,77	C = 2,78
Pierre calcaire à grains fins.	<i>d</i> = 2,34	C = 2,08
<i>Id.</i> <i>id.</i>	<i>d</i> = 2,27	C = 1,69
<i>Id.</i> <i>id.</i>	<i>d</i> = 2,17	C = 1,27
Pierre de liais à bâtir à gros grains.	<i>d</i> = 2,24	C = 1,32
<i>Id.</i> <i>id.</i>	<i>d</i> = 2,22	C = 1,27

Plâtre ordinaire gâché.	$d=$ »	$C=0,331$
Plâtre ordinaire très-fin, gâché.	$d=1,25$	$C=0,520$
Plâtre de moulage très-fin, gâché.	$d=1,25$	$C=0,44$
Plâtre aluné, gâché.	$d=1,73$	$C=0,63$
Terre cuite.	$d=1,98$	$C=0,69$
<i>Id.</i>	$d=1,85$	$C=0,51$
Bois de sapin, transmission perpendiculaire aux fibres.	$d=0,48$	$C=0,093$
<i>Id.</i> , transmission parallèle aux fibres.	»	$C=0,170$
Bois de noyer, transmission perpendiculaire aux fibres	$d=$ »	$C=0,103$
<i>Id.</i> , transmission parallèle aux fibres.		$C=0,174$
Bois de chêne, transmission perpendiculaire aux fibres.		$C=0,211$
Liège	$d=0,22$	$C=0,103$
Caoutchouc.	$d=$ »	$C=0,148$
Gutta-percha.	$d=$ »	$C=0,172$
Colle d'amidon	$d=1,017$	$C=0,425$
Verre.	$d=2,44$	$C=0,75$
Verre.	$d=2,55$	$C=0,88$

MATIÈRES PULVÉRULENTES.

Sable quartzeux.	$d=1,47$	$C=0,27$
Brique pilée, gros grains.	$d=1,0$	$C=0,139$
Brique pilée, passée au tamis de soie.	$d=1,76$	$C=0,165$
Brique en poudre fine obtenue par décantation.	$d=1,55$	$C=0,140$
Craie en poudre un peu humide.	$d=0,92$	$C=0,108$
Craie en poudre lavée et séchée.	$d=0,85$	$C=0,086$
Craie en poudre lavée, séchée et comprimée.	$d=1,02$	$C=0,103$
Fécule de pomme de terre.	$d=0,71$	$C=0,098$
Cendres de bois.	$d=0,45$	$C=0,066$
Poudre de bois d'acajou.	$d=0,31$	$C=0,065$
Charbon de bois ordinaire en poudre.	$d=0,49$	$C=0,079$
Braise de boulanger en poudre passée au tamis de soie.	$d=0,25$	$C=0,068$
Charbon de bois ordinaire en poudre passée au tamis de soie.	$d=0,41$	$C=0,081$
Coke pulvérisé	$d=0,77$	$C=0,160$
Limaille de fer.	$d=2,05$	$C=0,158$
Bi-oxyde de manganèse.	$d=1,46$	$C=0,163$

MATIÈRES FILAMENTEUSES.

Coton en laine, quelle que soit sa densité		$C=0,040$
Molleton de coton, <i>id.</i>		$C=0,040$
Calicot neuf, <i>id.</i>		$C=0,050$

Laine cardée, quelle que soit sa densité.		C = 0,044
Molleton de laine, <i>id.</i>		C = 0,024
Édredon, <i>id.</i>		C = 0,039
Toile de chanvre neuve.	$d = 0,54$	C = 0,052
<i>Idem</i> vieille.	$d = 0,58$	C = 0,043
Papier blanc à écrire.	$d = 0,85$	C = 0,043
Papier gris non collé	$d = 0,48$	C = 0,034

51. Tous ces nombres, excepté les quatre premiers, ont été obtenus par des expériences récentes; le quatrième résulte des expériences rapportées page 290 du premier volume du *Traité de la Chaleur*; les trois premiers ont été déduits du quatrième, d'après les rapports de conductibilité résultant des expériences de M. Despretz. Ces derniers nombres présentent beaucoup d'incertitude; mais heureusement, on a rarement l'occasion de les employer, parce que, ainsi que je l'ai démontré par des expériences directes (I^{er} vol., p. 292), la conductibilité des métaux étant très-grande, à moins d'employer des plaques d'une très-grande épaisseur, ce qui ne se fait jamais, on peut toujours considérer les deux surfaces comme étant à la même température. Il est important de remarquer que la conductibilité des matières textiles étant indépendante de leur densité, il s'ensuit nécessairement que leur conductibilité est la même que celle de l'air stagnant. J'ai aussi reconnu que pour les matières qui conduisent mal la chaleur, l'humidité augmente beaucoup leur faculté conductrice.

52. A l'aide de ces nombres et des formules [17] et [19], on peut calculer les quantités de chaleur transmises par des plaques, lorsqu'on connaît les températures t et t' de leurs surfaces. Ordinairement une de ces deux températures est connue, c'est ce qui arrive, par exemple, pour les murailles des édifices, lorsque pour les différentes pièces, une seule face est exposée à l'air, parce que la face opposée recevant le rayonnement de toutes les autres, toutes les surfaces intérieures ont une température peu différente de celle de l'air des pièces qu'elles forment; mais la température de la surface extérieure est nécessairement plus grande que celle de l'air extérieur, et elle ne peut être déterminée par un thermomètre. Pour ce cas et ceux analogues, où une des faces est maintenue à une certaine température connue et où l'autre face transmet la chaleur par le rayonnement et le contact de l'air, il faut transformer la formule [17] en une autre qui ne renferme que la température intérieure t , et la température t'' de l'air extérieur. Mais comme en employant les formules du refroidissement données par Dulong [12] (page 101), l'élimination de t' serait impossible, et qu'en admettant les formules [11] (page 101), on serait conduit à une équation du deuxième degré, assez compliquée et d'un usage fort difficile, il vaut mieux admettre pour le refroidissement de la surface la loi de Newton qui est suffisamment exacte pour de petits excès de température. D'ailleurs, dans tous ces calculs relatifs à la transmission de la chaleur, on ne peut jamais espérer qu'une approximation un peu grossière, parce qu'il y a des circonstances dont on ne peut pas tenir compte, comme l'accroissement de température des points de la surface à mesure qu'ils sont plus élevés, l'action des vents

et celle du soleil. Nous poserons donc, $M=Q(t'-t'')$, en faisant $Q=K+K'$. D'après cela nous aurons les deux équations

$$M = \frac{C(t-t')}{e}; \quad M = Q(t'-t''); \quad \text{d'où} \quad t' = \frac{Ct + Qet''}{C + Qe};$$

et enfin

$$M = \frac{CQ(t-t')}{C + Qe} = \frac{Q(t-t'')}{1 + Q\frac{e}{C}} \quad [20].$$

53. Si on avait deux plaques superposées, en admettant qu'il n'y ait pas de variations brusques de température dans le passage de la chaleur de la première plaque à la suivante, ce que d'ailleurs l'expérience indique, en désignant par θ la température à la jonction des deux plaques, par e et e' leurs épaisseurs, par C et C' leurs conductibilités, on aura, quand le régime sera établi,

$$M = \frac{C(t-\theta)}{e}; \quad M = \frac{C'(\theta-t')}{e'}; \quad M = Q(t'-t'').$$

En éliminant θ et t' entre ces équations, on trouve

$$M = \frac{Q(t-t'')}{1 + Q\left(\frac{e}{C} + \frac{e'}{C'}\right)} \quad [21].$$

54. On trouverait de même, pour un nombre quelconque de plaques, dont les épaisseurs seraient $e, e', e'', e''' \dots$, et les conductibilités $C, C', C'', C''' \dots$

$$M = \frac{Q(t-t'')}{1 + Q\left(\frac{e}{C} + \frac{e'}{C'} + \frac{e''}{C''} + \frac{e'''}{C'''} + \dots\right)} \quad [22].$$

55. Pour faire comprendre l'usage de ces formules nous les appliquerons à un mur de 10 mètres de hauteur formé de pierres calcaires, ayant une conductibilité égale à 1,70, la température de la surface intérieure étant de 15 degrés et celle de l'air de 7 degrés, température moyenne des sept mois de chauffage; le rayonnement de la pierre étant 3,60 et la valeur de K' étant 1,96, nous aurons $Q = K + K' = 5,56$, et la formule [20] devient

$$M = \frac{44,48}{1 + 5,56 \cdot \frac{e}{1,70}}$$

Cette formule, pour différentes valeurs de e , donne les résultats suivants :

$e=0^m,10.$	. . . . .	$M=33,42$	$e=0^m,6.$	. . . . .	$M=15,03$
$e=0^m,20.$	. . . . .	$M=26,86$	$e=0^m,7.$	. . . . .	$M=13,48$
$e=0^m,30.$	. . . . .	$M=22,92$	$e=0^m,8.$	. . . . .	$M=12,25$
$e=0^m,40.$	. . . . .	$M=19,24$	$e=0^m,9.$	. . . . .	$M=11,30$
$e=0^m,50.$	. . . . .	$M=16,84$	$e=1^m,0.$	. . . . .	$M=10,39$

56. Les formules qui précèdent supposent nécessairement que les surfaces intérieures des murailles ont la température de l'air intérieur, c'est ce qui existe sensiblement dans les pièces dont une seule face est exposée au refroidissement extérieur, à cause du rayonnement des autres faces. Mais quand toutes les faces de la pièce sont exposées à l'air extérieur il n'en est plus ainsi : la chaleur se transmet de l'air chaud aux surfaces intérieures des parois, de ces surfaces à celles qui sont extérieures, et de ces dernières à l'espace environnant par le contact de l'air extérieur et par le rayonnement; alors les surfaces intérieures ont une température inférieure à celle de l'air chaud, à une certaine distance, et la transmission de la chaleur à travers les parois de l'enceinte est beaucoup diminuée. Quand une pièce exposée à l'air de toutes parts est chauffée, ou par l'air chaud seulement, ou par l'air chaud et le rayonnement, les effets sont sensiblement les mêmes, parce que les surfaces de chauffe rayonnantes n'ont jamais qu'une petite étendue relativement à l'ensemble des surfaces intérieures.

57. Dans le cas dont il s'agit, qui est celui des églises, on peut arriver à déterminer la valeur de M en admettant que l'échauffement d'une muraille par de l'air chaud, s'effectue comme s'effectuerait le refroidissement de cette muraille par l'air, si la muraille avait une température plus élevée que l'air. Alors en conservant les notations précédentes et en désignant par T la température de l'air chaud on aura, après l'établissement du régime,

$$M = \frac{C(t-t')}{e}; \quad M = (K + K')(t' - t''); \quad M = K'(T - t),$$

équations qui donnent,

$$t = \frac{(K + K')(eK'T + Ct') + CK'T}{C(2K' + K) + eK'(K + K')}, \quad \text{et} \quad M = \frac{K'C(K + K')(T - t'')}{C(2K' + K) + eK'(K + K')} \quad [23].$$

58. Nous appliquerons ces formules au cas particulier que nous avons traité précédemment, et dans lequel on a C=1,70; K=3,60; K'=1,96; K+K'=5,56; T=15; t''=7. Ces formules deviennent

$$t = \frac{116,11 + 163,46e}{12,72 + 10,89e}; \quad M = \frac{148,08}{12,72 + 10,89e},$$

et pour différentes valeurs de e elles donnent les résultats suivants :

$e=0^m,10$	. .	$t= 9,60$	. .	$M=10,7$	$e=0^m,60$	. .	$t=11,22$	. .	$M=7,6$
$e=0^m,20$	. .	$t= 9,90$	. .	$M= 9,9$	$e=0^m,70$	. .	$t=11,33$	. .	$M=7,2$
$e=0^m,30$	. .	$t=10,34$	. .	$M= 9,2$	$e=0^m,80$	. .	$t=11,51$	. .	$M=6,9$
$e=0^m,40$	. .	$t=10,63$	. .	$M= 8,6$	$e=0^m,90$	. .	$t=11,68$	. .	$M=6,6$
$e=0^m,50$	. .	$t=10,88$	. .	$M= 8,1$	$e=1^m,00$	. .	$t=11,83$	. .	$M=6,3$

Ces nombres sont beaucoup plus petits que quand on suppose que les surfaces intérieures sont à la température de l'air; mais cette égalité n'a jamais lieu exactement, et on ne peut l'admettre que quand une très-petite partie des murailles est exposée à l'air extérieur.

Il est important de remarquer que si les murailles avaient une hauteur de 20 mètres, la perte par le contact de l'air serait 1,90 au lieu de 1,96, et on obtiendrait à peu près les

mêmes résultats. Par exemple, si l'épaisseur de la muraille était de $0^m,50$, dans les mêmes circonstances que précédemment, on trouverait $t=10,71$ et $M=7,98$.

Les nombres que nous venons d'obtenir pour la température de la surface intérieure des murailles, pour une hauteur de 20 mètres et une épaisseur de $0^m,50$, sont plus petits que ceux qui ont été observés à Saint-Roch; la différence résulte de l'influence des piliers intérieurs isolés qui doivent être à une température peu différente de celle de l'air, et surtout de la méthode employée pour mesurer la température des murailles qui donne certainement des indications trop petites.

39. Influence du sol. Dans les calculs relatifs au chauffage des grands édifices, on n'a point à tenir compte de la transmission de la chaleur à travers le sol. En effet, dans nos climats, la couche de température constante est à peu près à 8 mètres de profondeur, et sa température est égale à la température moyenne annuelle qui est de 10 à 11 degrés; cette profondeur varie avec la nature du terrain, et elle doit beaucoup diminuer au-dessous des lieux couverts de constructions, parce qu'ils sont soustraits aux variations diurnes et annuelles de température, et surtout quand les constructions, qui dépassent le sol, sont faites sur caves. D'après cela, la surface du sol des édifices doit rester constamment à une température bien voisine de 11 degrés, qui diffère bien peu de celle des surfaces intérieures des édifices dont l'air est maintenu à 15 degrés, et dont les surfaces extérieures sont exposées à l'air libre. Ainsi la quantité de chaleur perdue par le sol est en général très-petite, comme l'expérience le démontre, et elle peut être négligée.

40. Influence de la partie supérieure des édifices. Les édifices publics et les maisons particulières, étant toujours terminés à la partie supérieure par une charpente épaisse, horizontale, garnie de plâtre, dont la partie inférieure forme le plafond du dernier étage, et cette charpente, qui conduit déjà si mal la chaleur, étant surmontée de celle qui soutient la toiture, il en résulte qu'on peut complètement négliger la perte de chaleur par la partie supérieure des édifices. Il en est de même dans les églises dont les voûtes sont en pierre, parce que la toiture est soutenue par une grande quantité de pièces de bois qui rendent la diffusion de la chaleur très-lente. Mais quand les églises n'ont point de voûtes au-dessous de la toiture, il y a par la partie supérieure une perte de chaleur qu'il serait bien difficile d'évaluer (voir page 84).

41. Transmission de la chaleur à travers les vitres. Pour la transmission de la chaleur à travers les vitres, il y a plusieurs cas à examiner. Si la plus grande partie des murailles n'est pas exposée au refroidissement, leurs surfaces intérieures sont sensiblement à la température de l'air intérieur; mais dans le cas contraire, il y a une différence notable entre ces températures; dans ces diverses circonstances, la chaleur transmise par les vitres n'est pas la même, et dans chaque cas particulier elle varie, en outre, avec leur hauteur.

42. Supposons d'abord une pièce dont une seule face soit exposée à l'air, et négligeons la petite différence qui peut exister entre la température de l'air et celle de la surface intérieure des murailles. Les rayons de chaleur obscure ne traversant pas le verre, les vitres s'échauffent d'un côté par le rayonnement des surfaces intérieures et par le contact de l'air chaud et se refroidissent de l'autre par les mêmes causes. En admettant que le réchauffement et le refroidissement s'effectuent de la même manière pour les mêmes excès

de températures, et en désignant par t la température de l'air intérieur et des surfaces de murailles, par t'' celle de l'air extérieur, par K et K' les coefficients de refroidissement du verre, par mètre carré, par heure, pour un excès de température de 1 degré, et enfin, par θ la température des vitres, on aura évidemment

$$(t - \theta)(K + K') = (\theta - t'')(K + K'); \quad \text{d'où} \quad \theta = \frac{t + t''}{2},$$

$$\theta - t'' = \frac{t + t''}{2}, \quad \text{et} \quad M = \frac{t - t''}{2}(K + K') \quad [27].$$

Pour des hauteurs de 1^m, 2^m, 3^m, 4^m, 5^m, les valeurs de K' déduites de la formule [9] (page 101) sont : 2,400; 2,210; 2,130; 2,082; 2,049; et comme le rayonnement du verre est égal à 2,91; on trouve pour ces différentes hauteurs, et pour une différence de température de 1 degré entre t et t'' , les valeurs de M suivantes :

$$2,650; 2,560; 2,520; 2,496; 2,479.$$

Le plus grand de ces nombres est plus petit que celui que j'avais trouvé autrefois par des expériences directes, parce que j'avais employé une vitre d'une plus petite hauteur, et que dans ces expériences je n'avais pas pris toutes les précautions, que j'ai reconnues depuis, tout à fait indispensables.

43. Si la température intérieure était de 15 degrés, la température extérieure de 7 degrés, celle des vitres serait de 11 degrés, et la quantité de chaleur émise par mètre carré et par heure, serait, pour les hauteurs dont nous venons de parler, de

$$21,20; 20,48; 20,16; 19,97; 19,83.$$

44. Considérons maintenant, une enceinte entièrement vitrée, chauffée par de l'air chaud et faisons abstraction de l'effet produit par le sol. Les vitres ne seront échauffées que par l'air chaud, parce que toutes les surfaces étant à la même température, le rayonnement réciproque de tous les points ne change pas leur température. On aura alors, d'après les notations précédentes

$$K'(t - \theta) = (\theta - t'')(K + K'),$$

équation qui donne

$$\theta = \frac{K't + (K + K')t''}{2K' + K}; \quad \text{d'où} \quad M = K'(t - \theta) = (K' + K) \frac{K'(t - t'')}{2K' + K} \quad [28].$$

On trouverait, comme dans le cas précédent, que pour des hauteurs de 1^m, 2^m, 3^m, 4^m, 5^m, les quantités de chaleur transmises par mètre carré et par heure, pour une différence de température de 1 degré, seraient

$$1,65; 1,54; 1,49; 1,47; 1,45.$$

Pour une température intérieure de 15 degrés et une température extérieure de 7 degrés, les quantités de chaleur émises seraient

$$13,20; 12,32; 11,92; 11,60.$$

Ces nombres sont beaucoup plus petits que ceux que nous avons trouvés précédemment [43], parce que les vitres sont à une plus basse température. Mais nous n'avons

point eu égard au rayonnement du sol et à la chaleur perdue par l'air qui s'échappe à travers les joints des vitres, parce qu'il est impossible d'en tenir compte. Je pense que dans les serres et les constructions analogues, il faudrait admettre les chiffres de transmission qui seront donnés (article 45); quant à la perte de chaleur par les joints, elle peut varier dans des limites si étendues, qu'il est impossible de rien dire à cet égard.

45. Examinons enfin, le cas d'un bâtiment en maçonnerie, isolé de toutes parts, dont les vitres n'occupent qu'une petite partie de la surface : c'est évidemment le cas des églises. En conservant les notations précédentes et en désignant par t' la température des surfaces intérieures, par K_1 leur pouvoir rayonnant, et toujours par t la température de l'air chaud. La quantité de chaleur reçue par les vitres, par rayonnement, sera $(t-\theta)(K_1-K)$, celle qu'elles recevront par le contact de l'air sera $K'(t-\theta)$ et on aura

$$(t' - \theta)(K_1 - K) + K'(t - \theta) = (\theta - t'')(K' + K); \quad \text{d'où, } \theta = \frac{t''(K + K') + t'(K_1 - K) + K't}{2K' + K}.$$

$$\text{et, } M = (\theta - t'')(K + K') = \frac{(K_1 - K)(t' - t'') + K'(t - t'')}{2K' + K}(K + K') \quad [29].$$

Supposons $t=15^\circ$; $t''=7^\circ$; $K=2,91$; $K_1=3,6$; si les murailles ont de 10 à 20 mètres de hauteur, 0,50 d'épaisseur, une conductibilité égale à 1,70, la valeur de t' sera à peu près égale à 10 [53], et la valeur de M devient

$$M = \frac{2,07 + 8K'}{2,91 + 2K'}(2,91 + K');$$

et comme pour des hauteurs de 1, 2, 3, 4, 5 mètres les valeurs de K' sont 2,400; 2,210; 2,130; 2,082; 2,049; cette formule donne

$$14,64; 13,79; 13,24; 13,21; 13,06.$$

La transmission de la chaleur à travers les vitres est presque toujours accompagnée d'une perte de chaleur plus ou moins grande, résultant d'un écoulement d'air à travers les jointures des vitres ou des châssis qui les enveloppent, quand il y a ventilation, et d'un écoulement avec retour par des orifices moins élevés, quand il n'y a pas introduction d'air chaud dans la pièce; mais ces pertes sont tellement variables qu'il est impossible de les apprécier autrement que par l'expérience.

46. *Transmission de la chaleur à travers des enveloppes cylindriques.* Le cas que nous considérons maintenant serait, par exemple, celui d'un tuyau métallique parcouru par de la vapeur et environné de matières conduisant mal la chaleur afin de diminuer la perte de chaleur dans le trajet.

En désignant par M la quantité de chaleur transmise par unité de longueur dans l'unité de temps, par R et R' les rayons des cylindres, par t et t'' les températures intérieures et extérieures, par n le nombre 2,3025, et enfin par N l'expression $n(\log R' - \log R)$, on a

$$M = \frac{2\pi R'Q(t-t'')}{1 + \frac{QR'N}{C}} \quad [30].$$

S'il y avait plusieurs enveloppes dont les rayons seraient R', R'', R''', etc., et

dont les conductibilités seraient $C, C', C'', \text{etc.}$, en faisant $N' = n(\log R'' - \log R')$; $N'' = n(\log R''' - \log R'')$, etc., on aurait

$$M = 2\pi R^{(n)} \cdot \left\{ \frac{t - t''}{1 + QR^{(n)} \left(\frac{N}{C} + \frac{N'}{C'} + \frac{N''}{C''} + \dots \right)} \right\} \quad [31]$$

Il est évident que pour obtenir les quantités de chaleur émises par unité de surface, il faudrait diviser la première valeur de M par $2\pi R'$, et la seconde par $2\pi R^{(n)}$ *.

47. Reprenons maintenant la formule relative à une seule enveloppe et qui représente la quantité de chaleur émise par mètre courant,

$$M = \frac{2\pi QCR'(t - t'')}{C + QR'N}$$

La quantité de chaleur transmise M dépend, non-seulement de l'excès de température $t - t''$, mais des quatre quantités Q, C, R', N , ou de Q, C, R, R' . Si nous supposons d'abord que la quantité C soit très-petite par rapport à $QR'N$, la valeur de M se réduit à $2\pi C (t - t'') : N$, ou $2\pi C (t - t'') : n (\log R' - \log R)$, expression qui décroît rapidement à mesure que R' augmente, R restant constant. Si nous supposons au contraire que C soit très-grand relativement au terme $QR'N$, la valeur de M devient $2\pi QR'(t - t'')$, expression qui croît proportionnellement au rayon R' .

La première supposition se réaliserait pour une enveloppe de coton ou de laine; la

* Quand le régime est établi, la quantité de chaleur qui traverse l'enveloppe étant égale à celle qui traverse, dans le même temps, un élément annulaire infiniment mince de cette enveloppe, et cette dernière étant égale à la surface de cet élément $2\pi r$, multipliée par la conductibilité de la matière, par la différence de température dt de ses deux surfaces et en raison inverse de leur distance dr , on aura

$$M = - \frac{2\pi Cdt}{dr} \quad [1]$$

Le signe — exprime que les variations de température et du rayon de l'enveloppe ont lieu en sens contraires. Cette équation donne

$$Cdt = - \frac{M}{2\pi} \cdot \frac{dr}{r}$$

En intégrant entre les limites t et t' pour dt , et R et R' pour dr , il vient

$$C(t - t') = \frac{M}{2\pi} N \dots \dots \text{ et } M = \frac{2\pi C(t - t')}{N} \dots \dots \dots [2]$$

Mais comme t' est inconnu, nous chercherons à obtenir M en fonction de t et t'' . Nous aurons

$$M = 2\pi R'Q (t' - t'') \dots \dots \dots [3]$$

et en éliminant t' entre les équations [2] et [3], on trouve l'équation [30].

S'il y avait deux enveloppes différentes contiguës, en désignant par θ la température de la seconde surface, on aurait

$$\left. \begin{aligned} C(t - \theta) &= \frac{M}{2\pi} \cdot N \\ C'(\theta - t') &= \frac{M}{2\pi} \cdot N' \\ M &= 2\pi R''Q (t' - t'') \end{aligned} \right\} \text{équations qui donnent, } M = 2\pi QR'' \left\{ \frac{t - t''}{1 + QR'' \left(\frac{N}{C} \pm \frac{N'}{C'} \right)} \right\}$$

En répétant ces calculs pour 3, 4... enveloppes, on serait conduit à la formule générale [31].

seconde, si on supposait que l'enveloppe eût une conductibilité presque métallique. Mais on conçoit qu'entre ces deux suppositions extrêmes, qui conduisent aux deux valeurs de M que nous venons d'indiquer, il y a pour C certaines valeurs qui, comme nous le verrons bientôt, appartiennent à des corps réputés mauvais conducteurs et qui donnent pour M des valeurs plus grandes que celle qui correspond au cylindre nu ; alors, pour ces corps, l'accroissement de surface du cylindre a plus d'influence que le ralentissement dans la transmission de la chaleur à travers leur épaisseur.

48. Prenons pour exemple un tuyau de fonte horizontal de 0^m,05 de rayon et de 1^m de longueur, chauffé par la vapeur et recouvert successivement de différentes épaisseurs de coton.

En supposant l'air extérieur à 15°, il résulte de ce que nous avons dit [21] que la quantité de chaleur émise par mètre carré et par heure, quand le tuyau est nu, est égale à 837,8, et pour 1^m de longueur, cette quantité deviendra $837,8 \cdot 2\pi R = 263,07$.

Pour trouver les quantités de chaleur transmises par mètre courant et par heure, par le tuyau, quand il est recouvert d'une couche de coton ayant 0^m,01 ; 0^m,02 ; 0^m,03 ; 0^m,04 ; 0^m,05 ; 0^m,10 ; 0^m,15 d'épaisseur, il faut, dans la formule [30], faire $C=0,04$; $R=0,05$, et donner successivement à R' les valeurs 0,06 ; 0,07 ; 0,08 ; 0,09 ; 0,10 ; 0,15 ; 0,20. Pour obtenir les valeurs de Q , il faut se souvenir que $Q=K+K'$, K étant le refroidissement par rayonnement, et K' celui qui provient du contact de l'air ; si on suppose la matière enveloppante couverte de toile, on aura $K=3,65$; et les valeurs de K' se déduiront de la formule [7]. On trouve ainsi pour K' : 2,70 ; 2,60 ; 2,53 ; 2,48 ; 2,44 ; 2,31 ; 2,24 ; et pour les valeurs de Q : 6,35 ; 6,25 ; 6,18 ; 6,13 ; 6,09 ; 5,96 ; 5,90. Les valeurs de N sont 0,182 ; 0,336 ; 0,459 ; 0,587 ; 0,693 ; 1,098 ; 1,385. En substituant dans la formule [30] les nombres constants, elle devient

$$M = \frac{21,36 \cdot QR'}{0,04 + QR'N},$$

et on obtient les résultats suivants :

$R' = 0,06$	$R = 0,05$	$M = \frac{8,138}{0,109} = 74,6$
$R' = 0,07$	$R = 0,05$	$M = \frac{9,345}{0,186} = 50,2$
$R' = 0,08$	$R = 0,05$	$M = \frac{10,550}{0,271} = 39,1$
$R' = 0,09$	$R = 0,05$	$M = \frac{11,75}{0,363} = 32,3$
$R' = 0,10$	$R = 0,05$	$M = \frac{13,01}{0,462} = 28,2$
$R' = 0,15$	$R = 0,05$	$M = \frac{18,09}{1,02} = 18,7$
$R' = 0,20$	$R = 0,05$	$M = \frac{25,205}{1,674} = 15,0.$

Si les enveloppes étaient recouvertes d'une lame de fer-blanc, on aurait $K=0,4$, et par suite, les valeurs de Q deviendraient 3,10 ; 3,00 ; 2,93 ; 2,88 ; 2,84 ; 2,71 ; 2,65, et on trouverait pour les valeurs de M , 53,8 ; 40,8 ; 33,3 ; 28,8 ; 25,7 ; 17,8 ; 14,6.

L'influence du faible rayonnement de la surface va en diminuant à mesure que l'épaisseur de la couche augmente, parce que la valeur de C , relativement au terme $QR'N$, va toujours en diminuant, et que si l'on pouvait négliger C , la valeur de M deviendrait tout à fait indépendante de Q .

49. Dans les calculs précédents, nous avons admis 0,04 pour la valeur de C ; si on supposait une conductibilité 2 fois, 4 fois, 8 fois... n fois plus grande, il suffirait, pour obtenir les valeurs de M correspondantes, de multiplier le numérateur des fractions qui représentent les valeurs de M dans le tableau précédent, par 2, 4, 8... n , et d'ajouter au dénominateur, 0,04; 0,12; 0,28... 0,04 $(n-1)$. C'est ainsi qu'on a obtenu les valeurs suivantes qui correspondent aux mêmes valeurs de R' et aux mêmes températures intérieures et extérieures. La quantité de chaleur qui serait émise par le cylindre nu serait toujours égale à 263,07.

Tableau des quantités de chaleur transmises par mètre courant par un tuyau cylindrique horizontal de 0^m,05 de rayon, chauffé à 100°, placé dans une enceinte à 15°, et recouvert d'une enveloppe de différentes épaisseurs et de différentes conductibilités.

ÉPAISSEUR de la couche.	0 ^m ,01	0 ^m ,02	0 ^m ,03	0 ^m ,04	0 ^m ,05	0 ^m ,10	0 ^m ,15
CONDUCTIBILITÉ.	QUANTITÉS DE CHALEUR TRANSMISES.						
0,04	74,6	50,2	39,1	32,3	28,2	18,7	15,0
0,08	109,2	82,7	67,8	58,3	51,8	34,1	29,4
0,16	142,1	122,1	107,9	97,3	89,4	63,4	56,6
0,32	167,3	160,4	153,1	146,3	140,2	111,3	103,2
0,64	183,6	190,2	193,8	195,2	196,0	178,6	177,3
1,28	193,3	209,7	223,4	234,5	244,6	256,1	276,7
2,56	198,0	221,0	241,9	260,8	279,2	327,0	384,6
5,12	200,7	227,1	252,3	276,3	300,4	379,6	477,6

50. On voit d'après ce tableau, que les valeurs de M diminuent très-rapidement avec l'accroissement d'épaisseur quand la conductibilité est très-petite; que les variations sont très-faibles pour $C=0,64$; et que, pour des valeurs de C plus grandes, les valeurs de M augmentent avec l'épaisseur de la matière enveloppante. Pour d'autres valeurs du rayon du cylindre intérieur, les mêmes phénomènes se reproduiraient encore, mais pour d'autres épaisseurs.

51. Comme on conduit souvent de la vapeur par des tuyaux dans lesquels il importe de diminuer autant que possible sa condensation, nous avons calculé le tableau suivant, qui donne les quantités de chaleur émises par mètre courant de tuyaux de différents rayons chauffés par la vapeur, recouverts de différentes épaisseurs de coton, et placés

dans une enceinte à 15°. Pour chaque rayon du cylindre et chaque épaisseur de matière enveloppante, le tableau présente deux nombres, celui qui est supérieur représente la quantité de chaleur émise par mètre courant, et le nombre inférieur, le rapport de cette quantité à celle qui serait perdue si le tuyau était nu. J'ai supposé la fonte oxydée et son rayonnement égal à 3,35.

RAYON du CYLINDRE.	ÉPAISSEURS DE LA COUCHE ENVELOPPANTE.							
	0 ^m ,00	0 ^m ,01	0 ^m ,02	0 ^m ,03	0 ^m ,04	0 ^m ,05	0 ^m ,10	0 ^m ,15
	QUANTITÉS DE CHALEUR TRANSMISES PAR MÈTRE COURANT.							
0,01	75,92	22,40 (0,295)	16,5 (0,217)	13,9 (0,183)	12,3 (0,162)	11,2 (0,147)	8,7 (0,114)	7,9 (0,104)
0,02	120,15	35,8 (0,298)	25,6 (0,213)	20,9 (0,174)	17,7 (0,147)	15,6 (0,129)	11,5 (0,095)	9,8 (0,081)
0,03	164,33	49,0 (0,298)	33,7 (0,205)	26,7 (0,162)	22,8 (0,138)	20,1 (0,122)	14,1 (0,085)	11,6 (0,070)
0,04	208,56	61,7 (0,295)	41,8 (0,200)	33,3 (0,159)	27,5 (0,131)	24,2 (0,111)	16,4 (0,078)	13,4 (0,064)
0,05	252,64	74,5 (0,294)	50,2 (0,198)	39,1 (0,154)	32,4 (0,128)	28,2 (0,111)	18,7 (0,073)	15,0 (0,058)
0,10	473,51	137,7 (0,290)	90,2 (0,190)	68,2 (0,144)	55,8 (0,117)	47,7 (0,100)	29,3 (0,061)	22,6 (0,047)
0,15	694,84	200,8 (0,289)	130,4 (0,187)	97,6 (0,140)	78,7 (0,113)	66,4 (0,095)	39,6 (0,057)	30,8 (0,044)
0,20	916,20	263,9 (0,288)	169,3 (0,184)	125,8 (0,137)	101,5 (0,110)	85,4 (0,093)	49,9 (0,054)	38,2 (0,041)

52. *Transmission de la chaleur à travers des enveloppes sphériques.* En conservant les mêmes notations que précédemment, on a

$$M = \frac{4\pi C Q R R' (t - t'')}{C R + Q R' (R' - R)} \quad [32];$$

dans laquelle, M représente la quantité de chaleur émise par la surface totale de la sphère. Pour obtenir celle qui est émise par mètre carré, il est évident qu'il faudrait diviser M par $4\pi R'^2$ *.

53. *Diffusion de la chaleur.* Dans tout ce qui précède, nous n'avons considéré la transmission de la chaleur à travers les corps que quand un régime permanent de température y était établi; dans ce cas, les lois de la transmission sont très-simples, et les formules que nous avons données permettent de calculer les quantités de chaleur qui traversent les corps dans les différents cas qui se présentent ordinairement. Mais avant l'établissement du régime dans les corps qui sont terminés par deux surfaces dont l'une reçoit la chaleur et l'autre la disperse, et pendant toute la durée de l'échauffement pour les corps qui sont indéfinis dans un sens, les températures des différents points varient avec leurs positions et avec le temps, suivant des lois très-complicées, qui dépendent à la fois de la forme des corps, de la conductibilité de la matière, de sa capacité calorifique et de sa densité; alors ce ne sont pas toujours les corps formés des matières qui conduisent le mieux la chaleur qui la dispersent le plus facilement, parce que la dispersion dépend du rapport de la conductibilité à la capacité calorifique de la matière.

54. Il résulte des calculs consignés dans la note ci-jointe, que si on considère une surface plane indéfinie maintenue à une température T, et au-dessous un corps homogène, d'une très-grande épaisseur, à la température 0°, après une minute, les températures à des distances 0^m,001; 0^m,01; 0^m,1; 1^m,0; seront :

Pour le sable.	0,988 T; ... 0,887 T; ... 0,154 T; ... 0,000
Pour la pierre calcaire de construction.	0,997 T; ... 0,973 T; ... 0,745 T; ... 0,001 T;
Pour le fer	0,999 T; ... 0,992 T; ... 0,924 T; ... 0,339 T;
Pour le marbre à gros grains	0,999 T; ... 0,993 T; ... 0,938 T; ... 0,439 T;
Pour le plâtre de construction.	0,996 T; ... 0,962 T; ... 0,624 T; ... 0,000
Pour l'eau stagnante	0,993 T; ... 0,939 T; ... 0,399 T; ... 0,000

La formule qui a servi à calculer ces nombres est une conséquence rigoureuse du

* D'après les principes de la note précédente, on a

$$M = - \frac{4\pi r^2 C dt}{dr}; \text{ ou } 4\pi C dt = - M \frac{dr}{r^2};$$

et en intégrant entre les limites t et t' pour dt, et R et R' pour dr on trouve

$$4\pi C (t - t') = M \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right); \text{ d'où } M = \frac{4\pi C R R' (t - t')}{R' - R};$$

mais comme on a en même temps, $M = 4\pi R'^2 Q (t' - t'')$, en éliminant t' entre cette équation et la précédente, on trouve l'équation [32].

principe élémentaire de la transmission de la chaleur qui a été constaté par un trop grand nombre d'expériences pour qu'il soit permis de douter de son exactitude; mais dans l'établissement de cette formule, on a négligé l'effet de la dilatation et des variations de capacités calorifiques par la température, et, on a supposé que la conductibilité était indépendante de la température; cependant, comme pour les corps solides, les dilatations, les variations de capacités, et probablement les variations de conductibilité sont faibles, on peut regarder la formule comme représentant les faits avec une grande approximation. Alors les nombres que nous venons de rapporter font voir avec quelle rapidité la chaleur se disperse dans les corps, même dans ceux qui conduisent mal la chaleur après l'établissement d'un régime permanent de température.

Si on appliquait la formule à l'air stagnant, ce qui arriverait s'il était échauffé par la partie supérieure, on n'obtiendrait certainement qu'une approximation bien vague, à cause de la grande dilatation qu'il éprouve et des variations inconnues de sa capacité calorifique et de sa conductibilité avec l'accroissement de température. Cependant comme les résultats du calcul peuvent, au moins, donner une idée de la rapidité avec laquelle la chaleur se dissémine dans ce corps, nous les indiquerons. Après une minute et aux distances $0^m,001$; $0^m,01$; $0^m,1$ et 1^m , les températures indiquées par la formule sont

$$0,999 \text{ T}; \dots 0,996 \text{ T}; \dots 0,960 \text{ T}; \dots 0,620 \text{ T}$$

et après 1, 4, 9, 16, 25, 36 secondes les températures aux mêmes distances seraient

$$\begin{aligned} 0,997 \text{ T}; & \dots 0,973 \text{ T}; \dots 0,730 \text{ T}; \dots 0,00056 \text{ T}. \\ 0,998 \text{ T}; & \dots 0,986 \text{ T}; \dots 0,865 \text{ T}; \dots 0,0844 \text{ T}. \\ 0,999 \text{ T}; & \dots 0,991 \text{ T}; \dots 0,908 \text{ T}; \dots 0,2520 \text{ T}. \\ 0,999 \text{ T}; & \dots 0,993 \text{ T}; \dots 0,931 \text{ T}; \dots 0,38851 \text{ T}. \\ 0,999 \text{ T}; & \dots 0,994 \text{ T}; \dots 0,948 \text{ T}; \dots 0,4900 \text{ T}. \\ 0,999 \text{ T}; & \dots 0,995 \text{ T}; \dots 0,954 \text{ T}; \dots 0,5710 \text{ T}. \end{aligned}$$

Si la formule employée¹ était exactement applicable à l'air, il en résulterait que la

1. La question dont il s'agit a été résolue, à ma prière, par M. Cauchy; voici la formule à laquelle cet habile géomètre a été conduit

$$T' = T \left\{ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{kt}}} e^{-\varphi^2} d\varphi \right\}.$$

Dans cette formule, T représente la température constante de la surface plane qui termine le milieu, dont la température initiale était 0^0 , T' représente la température d'une couche du milieu située à une distance x et après le temps t, et k le rapport de la conductibilité de la matière à sa capacité calorifique multipliée par sa densité. Les valeurs de l'intégrale

$$A = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\varphi} e^{-\varphi^2} d\varphi.$$

ont été calculées par Kramp, et se trouvent rapportées dans l'ouvrage de M. Cournot sur la théorie des chances

dispersion de la chaleur à travers l'air serait plus grande qu'à travers tous les autres corps; mais on peut certainement conclure de ces résultats que la dispersion de la chaleur à travers l'air s'effectue avec une grande rapidité. Ce fait explique d'ailleurs un grand nombre de phénomènes qui paraissent fort singuliers.

Dans les églises qui sont chauffées par de l'air chaud qui s'échappe d'un certain nombre d'orifices percés dans le sol, les températures de l'air à 2^m et 20^m de hauteur diffèrent à peine de 1 degré, comme cela a été constaté à la Madeleine et à Saint-Roch. Dans le refroidissement des corps provenant du contact de l'air, la quantité de chaleur perdue diminue très-lentement avec la hauteur des corps, ce qui ne peut s'expliquer que par la facile dispersion de la chaleur à travers l'air. Il résulte aussi de ce fait que dans le chauffage des appartements par des foyers découverts, on utilise non-seulement une partie du rayonnement, mais une partie de la chaleur produite qui se transmet par dispersion à l'air environnant.

§5. *Observations générales sur le mode de calcul employé et sur l'usage des formules.* Dans tous les calculs relatifs à la transmission de la chaleur à travers les plaques, les enveloppes cylindriques et sphériques, nous avons supposé que les quantités de chaleur émises par les surfaces libres étaient proportionnelles aux excès de température de ces surfaces sur celle de l'air, mais, comme nous l'avons vu, ces quantités varient suivant une loi plus rapide. Cette approximation est cependant suffisante dans presque tous les cas, parce qu'on emploie des épaisseurs de matière assez grandes pour que les températures des surfaces extérieures n'excèdent celle du milieu environnant que de quantités pour lesquelles la loi de Newton est suffisamment exacte. Nous avons aussi admis dans

et des probabilités. Nous donnerons ici quelques valeurs de cette intégrale qui permettront de calculer les valeurs de T' avec un degré suffisant d'approximation.

$\varphi=0,0 \dots A=0,000$	$\varphi=0,6 \dots A=0,603$	$\varphi=1,2 \dots A=0,910$	$\varphi=1,8 \dots A=0,989$
$\varphi=0,1 \dots A=0,112$	$\varphi=0,7 \dots A=0,677$	$\varphi=1,3 \dots A=0,934$	$\varphi=1,9 \dots A=0,993$
$\varphi=0,2 \dots A=0,223$	$\varphi=0,8 \dots A=0,742$	$\varphi=1,4 \dots A=0,952$	$\varphi=2,0 \dots A=0,995$
$\varphi=0,3 \dots A=0,328$	$\varphi=0,9 \dots A=0,796$	$\varphi=1,5 \dots A=0,966$	$\varphi=2,1 \dots A=0,997$
$\varphi=0,4 \dots A=0,428$	$\varphi=1,0 \dots A=0,842$	$\varphi=1,6 \dots A=0,976$	$\varphi=2,2 \dots A=0,998$
$\varphi=0,5 \dots A=0,520$	$\varphi=1,1 \dots A=0,880$	$\varphi=1,7 \dots A=0,983$	$\varphi=2,3 \dots A=0,999$

Il est important de remarquer que les valeurs des conductibilités données précédemment représentant les quantités de chaleur qui traversent dans une heure des plaques d'un mètre carré de surface, d'un mètre d'épaisseur, et dont les températures des surfaces diffèrent de 1°, il faut prendre le mètre pour unité de longueur et l'heure pour unité de temps. Dans les calculs relatifs à l'eau, j'ai supposé que sa conductibilité était la même que celle de l'empois. Voici du reste les valeurs des conductibilités C, des capacités calorifiques c, et des densités admises pour calculer les valeurs de k relatives aux différents corps que j'ai considérés :

Sable quartzeux.....	C = 0,27;.....	c = 0,2;.....	d = 1,47.....	k = 0,917
Pierre calcaire.....	C = 1,27;.....	c = 0,21;.....	d = 2,22.....	k = 2,76
Fer.....	C = 29,0;.....	c = 0,113;.....	d = 7,73.....	k = 33,00
Marbre.....	C = 2,78;.....	c = 0,2;.....	d = 2,77.....	k = 5,018
Plâtre.....	C = 0,331;.....	c = 0,196;.....	d = 1,25.....	k = 1,351
Eau stagnante.....	C = 0,425;.....	c = 1,10;.....	d = 1.....	k = 0,425
Air.....	C = 0,04;.....	c = 0,25;.....	d = 0,0013.....	k = 123.

nos calculs une autre supposition, qui dans certains cas, pourrait occasionner de notables erreurs, nous avons admis que tous les points de la surface extérieure d'une muraille, ou d'une enveloppe conduisant mal la chaleur, étaient à la même température, mais il n'en est jamais ainsi; toujours les parties supérieures sont plus chaudes que les parties inférieures, parce que les parties inférieures sont refroidies par de l'air à la température ambiante, et les parties supérieures par de l'air qui s'est échauffé en s'élevant contre les surfaces du corps; je m'en suis d'ailleurs assuré par des expériences directes. J'ai été obligé de faire cette supposition à cause de l'impossibilité de déterminer la température des différents points de la surface. Mais il ne faut pas se faire illusion sur l'importance pratique de l'exactitude rigoureuse des formules et de la précision du calcul; les plus légers mouvements de l'air ont une grande influence sur la quantité de chaleur qu'il enlève; pour les corps exposés à l'air libre, les variations accidentelles et périodiques qu'il éprouve ne permettent jamais l'existence d'un régime permanent dans les températures intérieures; enfin, dans les calculs préliminaires on est obligé d'employer pour la conductibilité des nombres qui pour tous les corps, excepté les matières textiles, ne sont pas parfaitement exacts, car ils dépendent de leur densité, pour les pierres de leur état de cristallisation, pour les bois de la direction des fibres. Ainsi on ne peut regarder les résultats du calcul que comme des approximations seulement suffisantes pour guider les ingénieurs. Mais les appareils de chauffage et de ventilation ont toujours, dans les circonstances ordinaires, un excès de puissance, parce qu'ils doivent avoir été calculés pour les circonstances les plus défavorables, excès de puissance que l'on détruit, à l'inspection des thermomètres et des anémomètres fixes, par le mouvement des registres et des changements dans l'alimentation du foyer; alors l'incertitude du calcul, qui est toujours renfermé dans des limites assez restreintes, se trouve reportée sur l'excès de puissance des appareils qui n'est jamais nécessaire que dans des cas rares et de courte durée.

L'étude détaillée des projets doit être précédée de l'examen des quantités de chaleur maximum à fournir dans les circonstances les plus défavorables, et de la quantité moyenne de chaleur consommée pendant la durée du chauffage. Si le régime des murailles était constamment établi, les pertes de chaleur seraient proportionnelles aux excès de températures de l'intérieur et de l'extérieur, mais comme il faut un certain temps pour l'établir, en supposant la température extérieure constante, on conçoit qu'il ne peut jamais exister rigoureusement au milieu des variations diurnes et accidentelles de ces températures. Ces variations ne se manifestent que faiblement dans les températures intérieures, parce que les murailles renferment une grande quantité de chaleur, mais la chaleur qu'elles perdent doit être restituée, si l'on veut que la température intérieure ne s'abaisse pas. Tous ces phénomènes sont très-complicés, mais il résulte des expériences nombreuses faites sur une grande échelle, que les pertes moyennes sont sensiblement proportionnelles aux excès moyens des températures intérieures et extérieures.

D'après cela, la dépense moyenne de chaleur par jour sera proportionnelle à l'excès de la température constante, que l'on veut maintenir à l'intérieur, sur la température moyenne extérieure pendant la durée du chauffage, et on pourra facilement calculer cette quantité par les formules données dans ce chapitre, lorsqu'on connaîtra les surfaces des

murailles, leur épaisseur, la conductibilité de la matière avec laquelle elles ont été construites, les surfaces des vitres, et le chiffre de la ventilation. Dans ces calculs, comme je l'a déjà dit, on pourra négliger la perte de chaleur par le sol, et le plus souvent, par les voûtes et les plafonds.

La consommation moyenne de combustible se déduira facilement de la quantité moyenne de chaleur à fournir. Mais il ne faudrait pas compter sur plus de 4000 unités de chaleur par kilogramme de bonne houille, et sur plus de moitié de la puissance calorifique des autres combustibles, à cause de la perte de chaleur par la cheminée et par les parois des fourneaux.

Les dimensions des appareils devront être calculées pour les circonstances les plus défavorables. On pourrait cependant, pour les surfaces de chauffe, rester un peu au-dessous de celles qui correspondent au minimum de température extérieure, du moins quand il n'est pas de longue durée, et que les murailles ont une grande épaisseur, parce que la grande quantité de chaleur qu'elles renferment suffit pour pourvoir à un froid exceptionnel; d'ailleurs, si la température intérieure s'abaissait de 1 ou 2°, pendant les plus grands froids, on ne s'en apercevrait pas, car la sensation qu'on éprouve dans les lieux chauffés dépend surtout de l'excès de leur température sur celle de l'air extérieur. Mais l'économie qu'on obtiendrait pourrait avoir de graves inconvénients; si par une circonstance quelconque le chauffage avait été interrompu, et s'il fallait établir le régime dans les murailles au milieu de l'hiver on n'y parviendrait pas avec des appareils qui n'auraient pas une puissance suffisante.

CHAPITRE III.

NOUVELLES RECHERCHES SUR LE REFROIDISSEMENT ET SUR LA TRANSMISSION DE LA CHALEUR A TRAVERS LES CORPS MAUVAIS CONDUCTEURS.

Dans ces recherches, j'ai eu pour but d'obtenir des formules simples, et d'un usage commode dans la pratique. Quoique dans les applications il ne soit pas nécessaire d'avoir des formules d'une grande exactitude, à cause du grand nombre de circonstances régulières ou accidentelles dont il est impossible de tenir compte, je n'ai rien négligé pour obtenir des résultats aussi exacts que possible; les dispositions des appareils ont été changées plusieurs fois, pour éviter des causes d'erreur qui n'avaient pas été prévues, et les expériences ont toujours été répétées.

Les questions que j'ai cherché à résoudre sont certainement au nombre des plus difficiles et des plus compliquées de la physique; elles m'ont occupé plusieurs années. Dans ce long travail, j'ai été très-bien secondé par M. Daniel, répétiteur et préparateur du cours de physique générale à l'École centrale.

J'ai cru devoir décrire avec détails les appareils que j'ai employés, les méthodes qui ont été suivies dans les expériences, et les principaux résultats obtenus, afin de justifier les formules énoncées dans le chapitre précédent, et de faire voir le degré d'approximation sur lequel on peut compter dans leur usage.

§ 1. RECHERCHES SUR LE REFROIDISSEMENT.

Je me suis proposé de déterminer la quantité de chaleur qui sort à chaque instant d'un vase métallique rempli d'eau chaude, placé dans une enceinte à température constante, dont les parois sont couvertes d'une matière terne, et qui renferme de l'air sous la pression de l'atmosphère; le vase étant nu ou couvert de différentes substances.

Je ne me suis point occupé du refroidissement dans différents gaz, sous différentes

pressions, dans des enceintes dorées ou argentées, parce que ces questions sont purement théoriques, et ne se rencontrent jamais dans les applications.

Plusieurs physiciens se sont occupés des lois du refroidissement; mais le travail le plus complet et le plus remarquable est celui de MM. Petit et Dulong, publié en 1837. Ces expériences, qui ont toutes été faites sur des thermomètres à gros réservoirs, n'ont eu pour objet que la détermination des lois du refroidissement, et non la quantité de chaleur émise par unité de surface dans l'unité de temps; ainsi, les formules obtenues ne peuvent servir à rien dans les applications. J'ajouterai que dans certaines circonstances, MM. Laprovostaye et Dessains ont trouvé des résultats qui ne s'accordent pas avec les formules de Petit et Dulong; et je doutais de leur exactitude par plusieurs autres raisons, principalement parce que le refroidissement avait été observé dans une enceinte fermée, dont l'air ne pouvait pas prendre instantanément la température du bain dans lequel elle était plongée. J'ai donc cru devoir reprendre complètement la question, mais en la réduisant aux circonstances que j'ai indiquées, parce que ce sont les seules qui se rencontrent dans les applications.

Méthode suivie dans les expériences. Je me suis servi : 1° De six sphères en laiton mince, embouties au tour sur des moules en bois, et qui avaient été travaillées avec beaucoup de soin; leurs diamètres étaient compris entre 0^m,05 et 0^m,30; 2° d'un grand nombre de cylindres de laiton, de tôle, de fer-blanc et de fer étiré, dont les diamètres ont varié de 0^m,03 à 0^m,30, et les hauteurs de 0^m,05 à 0^m,60; 3° de plusieurs vases rectangulaires de laiton et de fer-blanc de différentes bases et de différentes hauteurs. Ces vases ont été employés successivement nus et couverts de différentes matières.

Le poids de l'eau renfermée dans ces vases étant considérable, le refroidissement était très-lent, et on pouvait facilement apprécier le temps que le thermomètre employait à descendre de 1°; cette durée a été rarement inférieure à 150 secondes.

Les surfaces de refroidissement ayant une grande étendue, la transmission de la chaleur par la tige du thermomètre était négligeable; car, en observant la vitesse du refroidissement, dans les mêmes circonstances, quand la tige était nue et couverte de papier doré, on a trouvé les mêmes résultats, quoique dans ce dernier cas la transmission fût à peu près deux fois plus petite que dans le premier.

Le temps se mesurait avec un compteur de Bréguet, à pointage, qui pouvait, à la rigueur, donner des tiers de seconde; mais on n'a jamais eu égard aux fractions de seconde.

Lorsqu'un vase plein d'eau se refroidit, les mouvements qui se produisent dans ce liquide sont très-complicés; le liquide refroidi contre les parois du vase tombe au fond, et il se forme de doubles courants qui établissent dans la masse de grandes différences de température. Ainsi, il était indispensable que le liquide fût sans cesse agité pour y établir une température uniforme. La nécessité d'une agitation continuelle est aussi un résultat direct de l'expérience; en laissant refroidir un vase plein d'eau chaude pendant un certain temps et en agitant ensuite brusquement l'eau, on voit souvent le thermomètre remonter de plusieurs degrés, surtout si le réservoir du thermomètre est court et plonge jusqu'au fond du vase. L'absence d'agitation n'est même pas compensée dans un

vase cylindrique vertical quand le réservoir du thermomètre occupe toute la hauteur du vase. Un vase de tôle cylindrique de 0^m,20 de hauteur, de 0^m,10 de diamètre, ayant été rempli d'eau chaude, dont la température était indiquée par un thermomètre dont le réservoir avait presque 0^m,20, on a observé successivement, aux mêmes températures, les vitesses du refroidissement quand le liquide était agité et quand il était au repos. Voici les résultats obtenus :

Excès de températures	55°	. . . . . 46°	. . . . . 38
Vitesses lorsque le liquide était agité.	0,0058	. . . . . 0,0047	. . . . . 0,0037
Vitesses lorsque le liquide était en repos.	0,0054	. . . . . 0,0044	. . . . . 0,0034

et cependant les agitateurs métalliques tendaient à répartir la chaleur dans la masse, même quand ils étaient immobiles.

Pour produire cette agitation permanente, j'ai employé la disposition suivante. Le vase, quelle que soit sa forme, est garni au centre de la partie supérieure d'une tubulure de 0^m,01 de diamètre, à travers laquelle passe une tige de fer de 0^m,004 de diamètre, terminée à la partie inférieure par une pointe qui s'engage dans une petite crapaudine fixée à l'intérieur du vase et au centre de sa partie inférieure; cette tige dépasse un peu la partie supérieure de la tubulure, et à cette extrémité elle est filetée de manière à recevoir un petit cylindre de laiton taraudé, qui porte à l'autre extrémité un petit cylindre de verre plein de 0^m,20 à 0^m,30 de longueur, terminé par un petit bouton; un bouchon placé dans la douille maintient la tige dans l'axe du vase, et on la fait tourner par le bouton qui termine la tige de verre. La partie inférieure de la tige porte 6 tiges d'un diamètre un peu plus petit, également espacées et courbées de manière à suivre le contour du vase; elles sont maintenues par de petits cercles horizontaux et portent chacune un grand nombre de petites plaques en fer-blanc, inclinées dans le même sens, de 45° sur la direction des méridiens. Il résulte de cette disposition que, quand on fait tourner la tige centrale, le liquide qui se trouve frappé par les ailettes, prend un mouvement de rotation et en même temps un mouvement de bas en haut ou de haut en bas qui produit un mouvement contraire dans la partie centrale. Dès expériences nombreuses ont été faites pour reconnaître quelle était la vitesse de rotation nécessaire, et j'ai reconnu que 2 ou 3 tours par seconde suffisaient dans tous les cas; ces expériences consistaient à observer la vitesse du refroidissement d'un même vase, dans les mêmes circonstances, en employant des vitesses de rotation plus ou moins rapides, dirigées dans le même sens ou en sens contraires; des vitesses plus grandes que celles que j'ai indiquées, dans le même sens ou alternativement en sens contraires, n'ont rien changé. On pouvait craindre que dans cette agitation si vive de l'eau il n'y eût un dégagement notable de chaleur, mais il n'en est rien; un vase sphérique plein d'eau ayant passé toute la nuit dans une enceinte à température constante, s'était mis exactement en équilibre avec elle, et sa température ne fut pas changée par une agitation très-rapide de l'eau. Cependant le thermomètre qui y était plongé pouvait indiquer une variation de 1:25 de degré.

Dans la disposition que je viens de décrire, les tiges méridiennes qui portent les palettes ne rejoignent pas la tige centrale à la partie supérieure, de sorte qu'à côté de la

douille qui reçoit cette tige, on peut en placer une autre, à travers laquelle passe la tige du thermomètre; mais pour éviter que les tiges méridiennes ou les palettes, dans leur mouvement, ne viennent rencontrer le réservoir du thermomètre, trois petites tiges verticales sont soudées au-dessous de la douille, et soutiennent un petit godet dans lequel la partie inférieure du thermomètre vient reposer.

Le refroidissement d'un corps dans l'air provient, comme on sait, de la différence du rayonnement de sa surface et de celle de l'enceinte dans laquelle il est placé et du courant d'air qui s'élève autour de sa surface. En plaçant dans une chambre le corps dont on veut observer le refroidissement, on pourrait connaître à peu près la température de l'air environnant, mais on ne connaîtrait pas celle des murailles, et les mouvements accidentels de l'air pourraient produire de grandes perturbations dans le refroidissement. On comprend alors la nécessité de placer le corps dans une enceinte dont on connaisse la température de l'air et des parois, et dont l'air ne reçoive que les mouvements qui résultent de son échauffement autour du corps. Dans mes premiers essais, je me suis servi d'une enceinte formée de deux vases de fer cubiques, concentriques, dont les faces étaient distantes de $0^m,04$; le volume de l'enveloppe extérieure était à peu près d'un mètre cube; l'intervalle des deux enveloppes était rempli d'eau; pour pouvoir placer dans cette enceinte les vases qui devaient se refroidir, elle était partagée par un plan vertical en deux parties égales qu'on pouvait séparer, dans l'enveloppe d'eau de chaque moitié se trouvaient des agitateurs et des thermomètres. Au centre de la face supérieure et à celui de la face inférieure, se trouvait un orifice circulaire d'environ $0^m,10$ de diamètre; le premier était destiné à donner passage à la tige du thermomètre et à celle de l'agitateur; à travers le second passait un cylindre de bois qui portait les supports des vases. Tout l'appareil était posé sur un trépied de $0^m,30$ de hauteur. Les expériences faites avec cet appareil présentaient souvent de fortes anomalies; il y avait toujours accroissement de vitesse quand on rendait libre l'orifice supérieur, et ces accroissements étaient d'autant plus grands que le vase avait de plus grandes dimensions. J'ai reconnu alors que, pour obtenir des résultats comparables à ceux qu'on obtiendrait dans une enceinte très-grande relativement aux vases qui s'y refroidissent, il fallait s'arranger de manière que l'air échauffé pût se dégager et qu'il fût constamment remplacé par de l'air à la température de l'enceinte. Voici la disposition qui remplit ces deux conditions :

L'enceinte est formée de deux cylindres concentriques en tôle plombée; l'intervalle qui les sépare et qui est plein d'eau est de $0^m,03$; le cylindre extérieur a $0^m,60$ de hauteur et $0^m,68$ de diamètre; cette enceinte cylindrique est formée, comme l'enceinte cubique, de deux parties égales qu'on peut séparer et qu'on maintient réunies par des crochets; le fond inférieur est continu et repose sur le sol; le fond supérieur est percé d'une ouverture circulaire de $0^m,30$ de diamètre; on place sur cet orifice deux vases plats en fer-blanc remplis d'eau qu'on éloigne plus ou moins, de manière à rendre la surface de l'orifice égale à peu près à la section du vase qui se refroidit. Chacune des deux moitiés de l'enceinte est percée près du fond et dans sa partie verticale d'une ouverture de $0^m,05$ de hauteur dont la surface est égale à celle d'un cercle de $0^m,30$ de diamètre; sa surface verticale extérieure est garnie d'un canal, formé par des planches de sapin, de même

section, s'ouvrant extérieurement à la partie supérieure de l'enceinte et communiquant par le bas avec sa partie intérieure; il résulte de cette disposition que l'air échauffé s'écoule constamment par l'orifice supérieur de l'enceinte et qu'il est remplacé par un courant d'air extérieur qui descend le long des faces latérales des deux moitiés de l'enveloppe, dont il prend la température, et pénètre dans l'intérieur de l'enceinte par les ouvertures dont nous avons parlé. Mais pour être sûr que l'air extérieur, avant d'arriver dans l'enceinte, prenne exactement la température de l'eau qui l'environne, les deux canaux verticaux et les orifices inférieurs sont garnis d'un grand nombre de plaques de tôle épaisse, verticales, très-rapprochées et soudées à la surface du cylindre extérieur dont elles prennent nécessairement la température; ces appendices ont une surface de plus de 2 mètres carrés.

J'ai fait avec cet appareil des expériences qui démontrent d'une manière bien nette l'influence de l'écoulement de l'air chaud. En observant les vitesses du refroidissement d'un cylindre de laiton, dans les mêmes circonstances, lorsque l'ouverture de dégagement de l'air chaud avait 0^m,15 de diamètre, qu'elle était égale au quart de la section du vase et qu'elle était réduite à quelques centimètres, elles ont été de 0,0000443, 0,0000434, 0,0000417. Pour des vases plus grands, les variations sont plus considérables.

La surface intérieure de l'enceinte était couverte de papier blanc dont le pouvoir rayonnant ne diffère pas sensiblement de celui des surfaces des appartements, comme nous le verrons plus loin.

Pour maintenir les vases qui se refroidissent au centre de l'enceinte, je les avais d'abord suspendus par trois cordons de soie, mais cette disposition avait un grand inconvénient : le mouvement de l'agitateur ébranlait les vases, et il en résultait des perturbations notables dans les vitesses du refroidissement. La disposition suivante permet de maintenir le vase complètement immobile, malgré le mouvement de l'agitateur; le vase porte à sa partie inférieure trois petites tiges de laiton dont les parties inférieures viennent se loger dans des cavités pratiquées dans de petits cylindres de bois, fixés à l'extrémité de trois tiges de verre verticales, supportées par un triangle horizontal en laiton garni de vis calantes. Pour certains cylindres, le mode de suspension était différent, mais j'en parlerai dans l'explication des figures de la planche 7.

Enfin, pour terminer, il me reste à parler des thermomètres dont je me suis servi. J'ai principalement employé 5 thermomètres étalons construits par M. Danger, ayant à peu près 1 mètre de longueur. Les tubes avaient été divisés par une méthode particulière, et j'en ai vérifié l'exactitude avec beaucoup de soin. Les points correspondants à l'eau bouillante ont été observés au moyen d'un appareil convenablement disposé pour ces grands instruments. Les zéros ont été souvent vérifiés; de 1844 à 1847, ils ont été notablement déplacés à peu près de 1:5 de degré, depuis ils n'ont pas changé sensiblement.

Description des appareils employés. Ces appareils sont dessinés dans la planche 7 à l'échelle de 0,1. Les figures 1, 2 et 5 représentent, la première, une coupe verticale de l'enceinte à température constante, la seconde une projection horizontale, et la troisième

une coupe horizontale. ABCDEF et A'B'C'D'E'F' sont deux cylindres en tôle plombée, concentriques, dont l'intervalle est rempli d'eau; cette enveloppe est composée de deux parties égales, séparées par un plan vertical, qu'on maintient réunies par des crochets; l'eau qu'elle renferme est agitée de temps en temps par des plaques horizontales annulaires de 0^m,03 de largeur, comprises dans un angle d'environ 30°, que l'on met en mouvement par des tiges verticales qui sortent par les douilles G, G, G, G; les températures de l'eau renfermée dans chaque moitié de l'enveloppe, sont indiquées par des thermomètres placés dans les douilles I et I'. KLM et K'L'M' sont deux canaux verticaux adossés à chacune des deux moitiés de la chambre, ils sont ouverts en dessus et communiquent par le bas, chacun avec une des ouvertures NP, pratiquées à la partie inférieure de chacune des moitiés de l'enceinte; ces canaux sont formés extérieurement par des planches de sapin et renferment dans toute leur hauteur des plaques épaisses de tôle soudées perpendiculairement à la surface extérieure de l'enveloppe, chacune a environ 0^m,10 de hauteur, une largeur égale à celle du canal, et les plaques d'une même rangée, sont placées au milieu de l'intervalle des plaques de la rangée qui précède et de celle qui suit; des plaques semblables existent dans les ouvertures NP. QR et QR' sont deux demi-cylindres en fer-blanc fermés et pleins d'eau à la température ordinaire: ils servent à fermer plus ou moins l'orifice AF de la chambre. ST est un trépied à vis portant 3 tubes de verre terminés par de petits bouchons de bois dans lesquels pénètrent les extrémités des tiges de cuivre soudées à la partie inférieure du vase dont on veut observer le refroidissement. Ce trépied est représenté en élévation et en plan dans les figures 3 et 4; les extrémités des vis pénètrent dans des orifices percés dans un triangle de fer fixé sur l'une des deux parties de la chambre (fig. 5).

Les figures 6 et 7 représentent une coupe verticale et une coupe horizontale d'un vase sphérique garni de son agitateur. Les plaques destinées à agiter l'eau sont soudées à 6 demi-cercles en fer, fixés par la partie inférieure à l'axe et dont les extrémités supérieures se terminent à un petit cercle horizontal dans l'intérieur duquel passe le petit cylindre à jour destiné à recevoir le thermomètre. Les vases cylindriques d'un grand diamètre sont disposés de la même manière (fig. 8 et 9). Lorsque les cylindres n'ont qu'un petit diamètre, l'agitateur est placé à côté du cylindre à jour qui renferme le réservoir du thermomètre (fig. 10 et 11).

On voit dans les figures 12, 13, 14, 15 et 16, différentes dispositions qui ont été employées pour fixer, dans un cadre placé dans l'enceinte, des cylindres verticaux et horizontaux. Ces dispositions avaient pour objet de rendre les vases parfaitement immobiles, malgré les mouvements imprimés à l'agitateur. Les cadres sont en fer ou en laiton; les tiges *a, a, a*, sont très-minces et en bois de sapin: elles pénètrent dans de très-petits appendices métalliques soudés aux vases. Pour les cylindres placés horizontalement, la tige de l'agitateur tournait dans un bouchon qui fermait la tubulure; il y avait un peu de jeu entre la tige et le bouchon, mais l'eau ne sortait pas du vase, à cause de la dilatation qu'éprouvait la petite quantité d'air restée dans le vase par la contraction de l'eau.

Les figures 17 et 18 sont des coupes verticales de deux vases cylindriques terminés par des demi-sphères et renfermant deux agitateurs. La figure 19 représente des cylindres

de fer étiré de mêmes diamètres et de différentes longueurs ; comme ils étaient remplis de mercure, un agitateur n'était pas nécessaire ; on observait leur refroidissement en les suspendant dans l'enceinte à température constante.

La figure 20 représente, à l'échelle de 1:5, le petit appareil employé pour lire sur les échelles des thermomètres. Il se compose d'une petite plaque *ab*, recouverte de papier blanc ; *c* et *d* sont deux douilles à travers lesquelles passe la tige du thermomètre : chacune renferme un petit anneau de liège que l'on comprime plus ou moins à l'aide d'une vis de pression ; au milieu de la plaque *ab*, se trouvent deux petites tiges parallèles entre elles et perpendiculaires à la direction de la plaque, sur lesquelles sont fixés, par des têtes de vis, deux fils métalliques très-fins ; ces fils déterminent un plan perpendiculaire à la tige du thermomètre et dans lequel l'œil doit être placé pour observer.

On voit dans la figure 21 l'appareil employé pour remplir les vases à de certaines époques de leur refroidissement. La condition à laquelle il fallait satisfaire est celle-ci : remplir d'eau un vase opaque dont le niveau est descendu, sans sortir le vase de l'enceinte à température constante et sans faire déverser le liquide. L'appareil se compose d'un tube de verre AB, ouvert par les deux bouts et garni d'une boule C ; à côté se trouve un autre tube de verre, recourbé, également ouvert par les deux bouts DEF ; les extrémités B et D sont à la même hauteur ; les deux tubes sont fixés, par leur extrémité inférieure, dans un bouchon qui entre facilement dans une tubulure du vase ; le bouchon porte, à sa partie supérieure, une petite plaque de laiton d'un diamètre plus grand que celui de la tubulure, ce qui permet d'enfoncer toujours le bouchon de la même quantité ; lorsque le bouchon est en place, le point B est à la hauteur que le liquide doit atteindre. Pour remplir le vase, on enlève le bouchon mobile qui ferme la tubulure et on le remplace par le bouchon qui porte les tubes, la boule C étant pleine d'eau et l'extrémité A étant fermée avec le doigt ; lorsque l'appareil est en place, on ouvre l'extrémité A et on aspire par l'extrémité F ; il est évident que le niveau du liquide dans le vase aura atteint les extrémités inférieures des tubes quand on aspirera de l'eau par le tube DEF, à cet instant on ferme l'extrémité A, on enlève l'appareil et on remet le bouchon ordinaire dans la tubulure.

Voici maintenant de quelle manière on opérerait. Le vase étant rempli d'eau chaude et placé sur son support, on fermait l'enceinte, on réglait l'ouverture de dégagement de l'air, de manière que sa surface fût à peu près égale à la section horizontale du vase ; l'agitateur du vase était tourné d'une manière continue et ceux de l'enceinte étaient mis de temps en temps en mouvement. Le temps que le thermomètre employait pour s'abaisser d'un petit nombre de divisions était observé avec soin et à différentes époques, et on en déduisait la vitesse du refroidissement ; mais ces observations et ces calculs ne sont pas aussi simples qu'ils le paraissent.

Il faut d'abord lire les indications du thermomètre, mais pour que cette lecture soit exacte, il faut que l'œil soit dans le plan horizontal qui passe par le sommet de la colonne de mercure. J'ai essayé d'employer un cathétomètre, mais j'ai dû y renoncer parce que la tige du thermomètre n'est jamais complètement immobile ; je me suis toujours servi du petit instrument décrit précédemment et représenté fig. 20, planche 7.

Mais un thermomètre plongé dans un liquide n'en donne la température qu'autant qu'il est immergé dans le liquide jusqu'au sommet de la colonne de mercure. Si le thermomètre indique une température T , et s'il n'est plongé dans le liquide que jusqu'au point de l'échelle correspondant à la température t , en désignant par t' la température moyenne de la colonne de mercure qui est au-dessus du liquide, il est évident que pour avoir la température T' , qu'indiquerait le thermomètre s'il était entièrement plongé dans le liquide, il faut à la température T , ajouter la dilatation de la colonne $T-t$ depuis t' jusqu'à T , ainsi on a

$$T' = T + (T-t)(T-t') : 6480 = T + (T-t)(T-t') \cdot 0,000154.$$

la fraction 1:6480 étant égale à la dilatation apparente du mercure dans le verre pour 1° . Reste à connaître t' ; mais t' est parfaitement égal à la température de l'air environnant, comme le démontrent les expériences que je vais rapporter; ainsi, cette température sera celle indiquée par un petit thermomètre placé à côté de la tige du grand thermomètre. Voici les expériences qui constatent le fait dont je viens de parler. Dans un grand vase cylindrique de 1 mètre de hauteur, de $0^m,25$ de diamètre, enveloppé d'une matière peu conductrice de la chaleur, garni d'un agitateur central qu'on faisait mouvoir à l'aide d'une manivelle, et plein d'eau chaude, j'ai placé un thermomètre étalon ne plongeant dans l'eau que de quelques divisions au-dessus du réservoir; à côté se trouvait un autre thermomètre qui plongeait dans l'eau jusqu'au niveau du mercure dans le tube; les températures des deux thermomètres, à des instants très-rapprochés, ont été, pour le premier, $54^\circ,89$ et $53^\circ,67$, et pour le second, $55^\circ,69$ et $55^\circ,08$; les différences sont $0^\circ,19$ et $0^\circ,20$, et les corrections calculées, comme je viens de l'indiquer, sont $0,20$. Pour des températures plus basses et plus élevées, j'ai obtenu la même coïncidence. Dans des expériences dont je parlerai plus loin, lorsqu'il sera question de la transmission de la chaleur à travers les corps mauvais conducteurs, je me servais d'un grand thermomètre disposé horizontalement, dont le réservoir était placé dans un petit vase en laiton, garni d'un agitateur, et plein d'eau dont on pouvait élever la température au moyen d'une lampe à alcool; en portant l'eau à l'ébullition, après un temps très-court, l'indication du thermomètre était constante, et elle n'a pas changé en enroulant autour du tube une bande de toile qui avait été plongée dans de l'eau à la température ambiante: ainsi la tige était exactement à cette température. Le thermomètre était très sensible, car 1° correspondait à peu près à 5 divisions éloignées les unes des autres d'environ 1 millimètre, et on pouvait estimer une variation de 1:50 de degré. Ainsi, on ne peut pas douter que la partie de la tige d'un thermomètre plongée dans l'air n'en prenne très-vite la température. Ce résultat paraît singulier à cause de la grande conductibilité du mercure et de la faible conductibilité du verre, mais le pouvoir conducteur du verre n'est pas aussi petit qu'on le pense, et il est plus que compensé par l'accroissement de surface, comme on peut le voir dans la note ci-jointe ¹.

¹ Considérons un fil métallique, renfermé dans un tube horizontal d'une matière conduisant mal la chaleur, et supposons que le fil soit maintenu à une température constante t , que r et r' soient les rayons du tube, G

Lorsqu'on observe le refroidissement d'un thermomètre, il faut avoir égard à la rentrée du mercure dans le réservoir, parce que le mercure froid, en pénétrant dans le réservoir, en abaisse la température. Dans mes expériences, non-seulement il n'y avait pas à faire cette correction, à cause du grand volume d'eau que renfermaient les vases, mais on a pu, dans presque tous les cas, négliger la chaleur totale perdue par la masse du thermomètre.

On désigne sous le nom de vitesse du refroidissement, le rapport entre une variation très-petite de température dT et le temps $d\theta$ pendant lequel elle s'est effectuée, c'est-à-dire $dT : d\theta$; et on appelle loi du refroidissement l'expression de ce rapport en fonction de la température du corps et de celle de l'enceinte.

Supposons qu'on ait observé deux températures d'un corps, à des instants très-rapprochés, et le temps θ que le liquide a mis pour passer de la première à la seconde. Pour en déduire la vitesse du refroidissement à cette époque, on peut supposer que dans le petit intervalle de temps θ , le refroidissement a suivi la loi de Newton, c'est-à-dire qu'à chaque instant il a été proportionnel à l'excès de la température de l'eau sur celle de l'enceinte; d'après cela on a

$$dT = -aT d\theta; \text{ d'où } \frac{dT}{T} = -a d\theta; \text{ et } m \log T = C - a\theta,$$

m étant le module des tables 2,3025. En désignant par A la température initiale, comme

la conductibilité de la matière, et t'' la température de l'air. Quand le régime sera établi, la même quantité de chaleur devra, à chaque instant, traverser chaque zone du cylindre et sortir par sa surface. La quantité de chaleur qui sortira par la surface extérieure, pour l'unité de longueur, sera sensiblement représentée par $2\pi Q'(t-t'')$; et celle qui traversera une zone dont l'épaisseur est dr sera $-C \cdot 2\pi r dt : dr$, car cette quantité de chaleur est proportionnelle à la surface de la zone, à la conductibilité de la matière, à la variation de température, et en raison inverse de l'épaisseur; le signe $-$ résulte, comme je l'ai déjà dit, de ce que les variations du rayon et de la température sont de signes contraires. Ainsi on aura

$$\frac{2\pi C r dt}{dr} = -2\pi Q'(t-t''); \text{ d'où } C dt = -Q'(t-t'') \frac{dr}{r};$$

et en intégrant

$$C(t-t') = Q'(t-t'')(\log r' - \log r)m; \text{ d'où } t' = \frac{Ct + Q'(\log r' - \log r)t''m}{C + Q'(\log r' - \log r)m}.$$

Si nous posons $r=0,0005$, $r'=0,005$, $t=100$, $t''=15$, $Q=9$, $C=0,8$, on trouve $t'=91^{\circ},25$. Remarquons maintenant que si la surface du fil métallique était nue, et si son rayonnement était le même que celui du verre, la quantité de chaleur émise par unité de longueur serait proportionnelle au rayon du cylindre et à l'excès de sa température sur celle de l'air, c'est-à-dire à $0,0005(100-15)=0,0425$; tandis que la quantité de chaleur émise par le cylindre enveloppant est proportionnelle à $0,005 \cdot (91,25-15)=0,3812$. Ainsi le cylindre de verre a rendu le refroidissement neuf fois plus grand que si l'enveloppe de verre était infiniment mince. Le nombre 9 que nous avons employé pour la valeur de Q , n'est pas rigoureusement exact; parce que le refroidissement provenant de l'air varie avec les dimensions des cylindres, mais il est suffisamment approché pour faire voir le rôle que jouent les tiges de verre des thermomètres. Le nombre 0,8 admis pour la conductibilité du verre diffère peu de celle que nous trouverons plus loin.

pour $\theta = 0$, on doit avoir, $T = A$, on trouve, $C = \log A$, et par suite, $m \log T = m \log A - a\theta$; d'où :

$$a = \frac{m(\log A - \log T)}{\theta} \quad [1].$$

Dans cette formule, a représente évidemment la vitesse du refroidissement pour un excès de température égal à l'unité. Mais, comme les deux observations dont il est question se font dans un intervalle de temps peu considérable, on peut obtenir une valeur approchée de a sous une forme beaucoup plus simple; en effet on peut regarder la vitesse du refroidissement comme constante, alors on a pour l'expression de cette vitesse $\nu = (A - T) : \theta$, et, comme l'excès moyen de température est $(A + T) : 2$, on trouve

$$a' = \frac{A - T}{\theta} \cdot \frac{2}{A + T} \quad [2].$$

Cette dernière formule étant d'un usage plus commode que la première, il était nécessaire d'examiner dans quel cas on pouvait s'en servir. Or, si on divise la première par la seconde, on trouve

$$\frac{a}{a'} = \frac{m(\log A - \log T)(A + T)}{2(A - T)}.$$

supposant $A - T = 1$, et en faisant successivement $T = 10, 15, 20 \dots, 60$, le rapport de $\frac{a}{a'}$, varie de 1,000219 à 0,999068; ainsi, pour une variation de température de 1 degré et des excès de températures de 10 à 60 degrés, les valeurs de a et de a' sont sensiblement égales. En admettant $A - T = 3$ degrés, dans les mêmes limites, le rapport $\frac{a}{a'}$ varie de 1,0052 à 0,99977; ainsi, dans ces nouvelles limites, qui n'ont jamais été dépassées dans les expériences, on peut encore employer la formule [2]. D'après cela, en désignant par t et t' les températures observées, qui ne devront pas différer de plus de 3 degrés, par t'' celle de l'enceinte, et par ν la vitesse du refroidissement, ou l'abaissement du thermomètre pendant une seconde, on a

$$\nu = \frac{t - t'}{\theta}, \quad \text{et,} \quad a = \frac{t - t'}{\theta} : \left(\frac{t + t'}{2} - t'' \right).$$

Pour éviter les erreurs de lecture, j'observais les époques correspondantes à l'abaissement du thermomètre de 5 divisions, intervalle qui équivalait à peu près à 1 degré, et cela 4 fois de suite; puis je déterminais la valeur de ν pour la première et la troisième observation et pour la deuxième et la quatrième, et je prenais la moyenne des valeurs de a correspondantes. Je dois dire que, malgré tous mes soins, les valeurs de θ dans ces quatre observations successives n'allaient pas toujours en croissant d'une manière régulière; mais ces anomalies disparaissent en grande partie dans la méthode que j'ai indiquée.

Les valeurs de ν et de a , obtenues comme je viens de l'indiquer, doivent éprouver une correction assez importante. Lorsque le vase a été rempli d'eau à une température voi-

sine de 100 degrés, et qu'il se refroidit, l'eau se contractant plus que le métal, une partie du sommet du vase, croissante avec le refroidissement, cesse d'être en contact avec le liquide, et, par conséquent, émet une quantité de chaleur plus petite que si elle était mouillée, et, par suite, la loi du refroidissement doit éprouver un accroissement. A la vérité, au commencement du refroidissement et jusqu'à un certain terme, il y a une circonstance physique qui s'oppose à la production de l'effet que nous venons de signaler; je veux parler de la dépression centrale et, par suite, de l'élévation latérale qu'éprouve le liquide, par l'effet de sa rotation provenant du mouvement de l'agitateur, mais toujours après un certain refroidissement, surtout si la rotation n'est pas très-rapide, l'effet signalé se manifeste. Pour éviter cette cause d'erreur, je remplissais le vase d'eau avant chaque série d'expériences; en pesant l'eau introduite, il était facile d'en déduire la vitesse qu'on aurait observée si le vase avait contenu le poids de l'eau qu'il renfermait à 15 degrés. J'ai ensuite reconnu qu'on pouvait éviter ces pesées, car le poids de l'eau à t degré renfermé dans un vase est égal à celui qu'il contient à 15 degrés diminué de la dilatation de l'eau de 15 degrés à t degrés: la dilatation du vase pouvant être négligée par rapport à celle de l'eau.

Pour chaque vase, et pour des excès de températures compris entre 25 degrés et 65 degrés, j'ai déterminé 4 ou 5 valeurs de a . Si ces valeurs eussent été égales entre elles, le refroidissement eût suivi la loi de Newton, et la vitesse du refroidissement eût été représentée par la formule, $v=at$; mais les valeurs de a allaient en décroissant avec l'excès de température, et j'ai reconnu que la vitesse du refroidissement, dans les limites que je viens d'énoncer, était très-bien représentée par la formule $v=mt(1+nt)$, et, par conséquent, que $a=\frac{v}{t}=m(1+nt)$. Nous verrons aussi que n est un nombre constant

pour tous les corps polis, et qu'il l'est également, mais avec une valeur différente, pour les corps ternes; pour les premiers $n=0,073$, et pour les derniers $n=0,0065$.

En observant le refroidissement du même vase, lorsque la température de l'enceinte avait différentes valeurs, j'ai reconnu que la vitesse du refroidissement restait la même, pour les mêmes excès de température, quand la surface du vase était brillante, mais qu'elle augmentait avec la température de l'enceinte quand le corps avait une surface terne. Ces effets proviennent de ce que le refroidissement par le contact de l'air ne dépend que de l'excès de température du corps sur celle de l'enceinte, tandis que le refroidissement par le rayonnement varie avec la température absolue de l'enceinte, et que le rayonnement des métaux polis est très-petit relativement à celui des corps ternes. Pour rendre les expériences comparables entre elles, je les ai ramenées à ce qu'elles auraient été si la température de l'enceinte eût été constamment de 12 degrés, et pour cela les vitesses du refroidissement des corps ternes ont été multipliées par $1-0,003(t''-12)$, formule qui s'accorde très-bien avec les expériences faites à des températures de l'enceinte comprises entre 8 degrés et 16 degrés. Cette correction est aussi parfaitement d'accord avec la formule de Dulong; la vitesse du refroidissement dû au rayonnement est représentée par $ma^\theta(a^t-1)$, θ étant la température de l'enceinte, t l'excès de température, et a le nombre 1,007; or, si on calcule la valeur de a^θ , pour $\theta=8, 10, 12, 14, 16$, et si on divise chacune des valeurs par celle correspondante à $\theta=12$, on trouve

0,970 ; 0,985 ; 1 ; 1,015 ; 1,031 ; dont les différences sont à peu près de 0,015 et de 0,0075 pour 1 degré, et, comme la vitesse du refroidissement dû à l'air diffère peu de celle due au rayonnement pour les corps ternes, la correction pour 1 degré serait de 0,0037.

Toutes les expériences ont été faites sous la pression de l'atmosphère ; j'ai souvent mesuré cette pression, et je n'ai jamais trouvé que les faibles variations qu'elle éprouve aient une influence notable sur les résultats obtenus ; du moins cette influence était renfermée dans les limites d'erreur des observations. Ceci s'accorde encore très-bien avec la formule de Dulong. D'après cet habile physicien, la vitesse du refroidissement provenant du contact de l'air est donnée par la formule

$$\nu = np^{0,45} t^{1,233}$$

dans laquelle n est un nombre constant, p la pression barométrique en mètres, et t l'excès de température. Or, si on calcule la valeur de $p^{0,45}$, en prenant pour p successivement 0,74 ; 0,75 ; 0,76 ; 0,77 ; 0,78, et si on divise successivement toutes ces valeurs par celle qui correspond à 0,76, on trouve 1,0113 ; 1,0056 ; 1 ; 0,9932 ; 0,9875. Les nombres extrêmes ne diffèrent de l'unité que de 0,011 et 0,012, et ces différences sont de l'ordre des erreurs que comportent les expériences dont il s'agit.

Les constantes de la formule, $\nu = mt(1 + nt)$, étant déterminées par l'expérience, il fallait en déduire la quantité M de chaleur qu'émettrait le corps par mètre carré et par heure, si sa température restait constante, car c'est évidemment de cette quantité qu'on a besoin dans les applications. Or ν représentant l'abaissement de température dans une seconde, la valeur de M est évidemment donnée par l'expression

$$M = \frac{\nu \cdot P \cdot 3600}{S}$$

dans laquelle P représente, en kilogrammes, le poids de l'eau renfermée dans le vase, augmenté de celui du vase vide multiplié par sa capacité calorifique, 3600 le nombre de secondes renfermées dans une heure, et S la surface du vase en mètres carrés. La surface du vase doit être augmentée de celle des pieds et des douilles ; heureusement cette correction est très-petite, car elle présente beaucoup d'incertitudes, parce que ces appendices émettent moins de chaleur par rayonnement qu'une surface égale du vase, et que leur refroidissement, par le contact de l'air, diffère également de celui d'une même étendue du vase.

La valeur de M ainsi obtenue, il fallait séparer l'effet provenant du rayonnement de celui qui résulte du contact de l'air, car le premier est évidemment indépendant de la forme des vases, et il est facile de prévoir qu'il n'en est point ainsi du second. On ne pouvait pas penser à observer le refroidissement dans le vide, la grandeur des vases, l'agitation continuelle qu'on doit imprimer à l'eau ne le permettaient pas. Je suis parvenu à séparer les deux effets en question à l'aide d'un principe découvert par Dulong, et que j'ai vérifié par un grand nombre d'expériences. Ce principe est celui-ci : *Le refroidissement d'un même vase par le contact de l'air est indépendant de la nature de sa*

surface. Il résulte de ce principe que, si on observe le refroidissement d'un vase de cuivre quand il est nu et quand sa surface est recouverte de noir de fumée, la différence des vitesses sera égale à la différence des rayonnements du noir de fumée et du métal dans les circonstances des expériences; alors, en déterminant par des expériences directes le rapport des rayonnements du noir de fumée et du cuivre poli, on pourra en déduire les valeurs absolues des rayonnements de ces deux surfaces, et, par suite, la valeur absolue du refroidissement dû au contact de l'air. Ayant la valeur absolue du rayonnement d'une matière, en cherchant le rapport des rayonnements des autres matières à celle-là, j'en ai déduit la valeur absolue de leur rayonnement; alors, en observant le refroidissement de différents vases couverts de papier ou de noir de fumée, et retranchant des formules obtenues celle qui représentait le refroidissement dû au rayonnement, j'en ai déduit, pour ces différents vases, le refroidissement provenant du contact de l'air.

Le nombre des séries d'expériences a été très-considérable, non-seulement parce que j'ai opéré sur un grand nombre de vases différents, couverts de différentes matières; mais parce que toutes les précautions que j'ai indiquées n'ont pas été prises d'abord, et que les expériences ont souvent été répétées plusieurs fois. Je ne rapporterai que les expériences qui ont été faites en dernier lieu. Mais je dois rappeler, que dans chaque série partielle d'expériences, la vitesse ν , ou l'abaissement de température dans une seconde s'obtenait en divisant la variation de température par le temps écoulé; et, qu'en admettant que la vitesse soit donnée par la formule, $\nu = mt(1 + 0,0073t)$ pour les vases polis, et par la formule, $\nu = mt(1 + 0,0065t)$ pour les vases ternes, t représentant l'excès de température, la valeur de m , calculée d'après ces formules, devait être constante.

Vases sphériques. 1° Petite sphère, nue. $r = 0,07465$; $P = 1^k,732$. L'enceinte avait une ouverture égale à la section du vase. La surface avait été nettoyée avec de la terre pourrie, à l'eau, immédiatement avant le commencement des expériences.

Excès de températures	67°,59	45°,84	32°,83	26°,19
Valeurs de m	0,0000436;	0,0000436;	0,0000438;	0,0000433; moy. 0,0000436;

$$M = \frac{0,0000436.3600.1,732}{0,0736} \cdot t(1 + 0,0073t) = 3,784t(1 + 0,0073t) = 3,784t + 0,0276t^2.$$

2° La même sphère, couverte de papier blanc :

Excès de températures	62°,17	48°,22	37°,16	26°,68
Valeurs de m	0,0000838;	0,0000842;	0,0000841;	0,0000839; moy. 0,0000840;

$$M' = \frac{0,000084.3600.1,732}{0,0718} \cdot t(1 + 0,0065t) = 7,294t(1 + 0,0065t) = 7,294t + 0,04741t^2.$$

3° La même sphère, couverte de noir de fumée déposé par la flamme d'une chandelle sur le papier :

Exc. de temp.	49°,50	48°,43	47°,35	34°,50	33°,42	32°,33
Valeurs de m	0,00008899;	0,00008916;	0,00008942;	0,00008859;	0,00008706;	0,00008714 moy. 0,0000883;

$$M'' = \frac{0,0000883.3600.1,732}{0,0718} \cdot t(1 + 0,0065t) = 7,548t(1 + 0,0065t) = 7,548t + 0,04306t^2.$$

4° Sphère nue, plus grande que la première. $r = 0,1058$; $P = 4^k,864$. Elle avait été polie comme la première. L'enceinte avait une ouverture égale à la section du vase.

Excès de températures 69°,55 52°,00 27°,20
Valeurs de m 0,0000266; 0,0000261; 0,0000261; moy. 0,0000262;

$$M = \frac{0,0000262 \cdot 3600 \cdot 4,864}{0,14217} \cdot t(1 + 0,0073t) = 3,234t(1 + 0,0073t) = 3,234t + 0,0236t^2.$$

5° Même sphère, couverte de papier blanc :

Excès de températures 62°,67 46°,44 32°,35
Valeurs de m 0,0000548; 0,0000549; 0,0000545; moy. 0,0000547;

$$M' = \frac{0,0000547 \cdot 3600 \cdot 4,864}{0,14137} \cdot t(1 + 0,0065t) = 6,7745t(1 + 0,0065t) = 6,7745t + 0,04944t^2.$$

6° Sphère nue polie, d'un plus grand diamètre que la seconde. $r = 0^m,1538$; $P = 14^k,241$.

Excès de températures 57°,36 47°,10 31°,76
Valeurs de m 0,00001687 0,00001732 0,00001683 moy. 0,00001703;

$$M = \frac{0,00001703 \cdot 3600 \cdot 14,241}{0,29864} \cdot t(1 + 0,0073t) = 2,884t(1 + 0,0073t) = 2,884t + 0,0210t^2.$$

7° La même sphère, couverte de papier blanc :

Excès de températures 48°,31 36°,70 31°,73 21°,73
Valeurs de m 0,00003717 0,00003709 0,00003706 0,00003750 moy. 0,0000372;

$$M' = \frac{0,0000372 \cdot 3600 \cdot 14,241}{0,29784} \cdot t(1 + 0,065t) = 6,4032t(1 + 0,065t) = 6,4032t + 0,0416t^2.$$

Ces expériences conduisent à un premier résultat important qui avait été annoncé par MM. Petit et Dulong, mais qui n'avait point été vérifié sur une grande échelle. Si nous désignons par R, R' , les quantités de chaleur émises par le rayonnement du cuivre poli et du papier, et par A celle qui provient du contact de l'air, on aura pour chacune des trois sphères $M = A + R$; $M' = A + R'$; et si, pour une même sphère, la valeur de A est réellement indépendante de l'état de sa surface, on aura pour chaque sphère, $M' - M = R' - R$, et par conséquent la valeur de $M' - M$ doit être constante; or, on trouve

$$\begin{aligned} \text{Pour la première. . . . } M' - M &= 3,510 t + 0,0198t^2 \\ \text{Pour la seconde } M' - M &= 3,540 t + 0,0258t^2 \\ \text{Pour la troisième. . . . } M' - M &= 3,512 t + 0,0206t^2 \end{aligned}$$

Ces valeurs diffèrent bien peu les unes des autres, et les irrégularités des petites différences ne laissent aucun doute sur l'exactitude de la loi.

Si maintenant on retranche des résultats des expériences faites sur la petite sphère, quand elle était couverte de noir de fumée, ceux relatifs à la même sphère nue, la différence $M'' - M = 3,764t + 0,0214t^2$ représentera la différence $R'' - R$ entre le rayonnement du noir de fumée et celle du cuivre poli; or, nous démontrons plus loin que

le rayonnement du noir de fumée est égal à 15, 5, celui du laiton poli, et il résulte de là, qu'on a pour la petite sphère :

$$M'' - M = 3,764t + 0,214t^2 = 14,5R,$$

Et par suite, $R = 0,259t + 0,001475t^2 = 0,259t(1 + 0,0057t);$
 $R'' = 4,01t + 0,0227t^2 = 4,01t(1 + 0,0057t).$

Et comme, $M' - M = 3,510t + 0,0198t^2 = R' - R,$ on en déduit
 $R' = 3,769t + 0,02127t^2 = 3,769(1 + 0,00564).$

A, représentant le refroidissement dû au contact de l'air, nous aurons, $A = M - R,$ et par suite,

$$A = 3,525t + 0,02613t^2 = 3,525t(1 + 0,0074t).$$

Si on cherche de même les valeurs de A', du refroidissement de l'air sur la seconde sphère, en retranchant successivement de M et M' les valeurs de R et R', on trouve

$$A' = 2,975t + 0,02212t^2, \text{ et } A'' = 3,005t + 0,02818t^2,$$

valeurs qui diffèrent bien peu, et dont la moyenne est

$$A' = 2,99t + 0,0251t^2 = 2,99t(1 + 0,0081t).$$

En répétant les mêmes calculs sur la troisième sphère, on trouve

$$A'' = 2,625t + 0,01953t^2; \text{ et } A''' = 2,634t + 0,0204t^2,$$

dont la moyenne est $A'' = 2,63t + 0,02t^2 = 2,63t(1 + 0,0076t).$

On voit, d'après ces résultats, que la transmission de la chaleur par mètre carré et par heure, pour le même excès de température provenant du contact de l'air, va en décroissant à mesure que la sphère a un plus grand diamètre.

Cube. Je n'ai employé qu'un seul cube; il était en laiton de 0^m,15 de côté. Les expériences exigent un soin particulier pour placer les faces verticalement; car, quand cette condition n'est pas satisfaite, on ne peut pas remplir exactement le vase, et, en outre, les mouvements de l'air n'ont plus lieu de la même manière que quand les faces sont verticales, et ces deux circonstances peuvent produire de grandes anomalies.

Voici les résultats des expériences :

Cube nu, métal brillant; côté du cube = 0^m,15; P = 3^k,277.

Excès de températures 67^o,48 66^o,39 42^o,59 41^o,45
 Valeurs de m 0,0000418; 0,0000413; 0,0000417; 0,0000412; moy. 0,0000413;

$$M = \frac{0,0000413.3600.3,277}{0,1360} . t(1 + 0,0073t) = 3,573t(1 + 0,0073t) = 3,580t + 0,0261t^2.$$

Cube couvert de papier blanc :

Excès de températures 64^o,60 34^o,46 23^o,20
 Valeurs de m 0,0000809; 0,0000812; 0,0000806; moy. 0,0000809;

$$M = \frac{0,0000809.3600.3,277}{0,1352} . t(1 + 0,0065t) = 7,053t(1 + 0,0065t) = 7,053t + 0,0458t^2.$$

En retranchant de la valeur de M, celle de R trouvée précédemment, et de la valeur de M' celle de R', on trouve pour la transmission de chaleur par l'air :

$$A = 3,321 t + 0,0246 t^2 = 3,321 t (1 + 0,0074 t)$$

$$A = 3,284 t + 0,0246 t^2 = 3,284 t (1 + 0,0074 t)$$

valeurs qui diffèrent à peine de un centième. Ces expériences sont une nouvelle confirmation de ce fait : que le refroidissement dû au contact de l'air est indépendant de la nature de la surface du corps. On voit aussi que la valeur de A diffère notablement de celle relative à la sphère inscrite, dont le coefficient de t est, comme nous l'avons vu, de 3,525.

Cylindre de laiton de 0^m,20 de hauteur et de 0^m,10 de diamètre. Les expériences faites sur ce cylindre ont présenté beaucoup de régularité pour un même état de la surface, mais, en retranchant de chaque formule, obtenue pour différentes natures de la surface, celle qui représente la vitesse due au rayonnement, j'ai trouvé des résultats qui diffèrent quelquefois de près de 0,1. En prenant toutes les précautions nécessaires pour que l'axe du cylindre fût bien vertical, j'ai obtenu les résultats suivants :

Cylindre nu. M = 3,401 t (1 + 0,0073 t) = 3,401 t + 0,0248 t²,

Cylindre couvert de papier. . . . M' = 7,010 t (1 + 0,0065 t) = 7,010 t + 0,0462 t²,

Cylindre couvert de noir de fumée. M'' = 7,203 t (1 + 0,0065 t) = 7,203 t + 0,0468 t².

En retranchant de M la valeur de R, de M' celle de R' et de M'' celle de R'', on trouve, pour la transmission de la chaleur par l'air :

$$A = 3,142 t (1 + 0,0073 t),$$

$$A = 3,241 t (1 + 0,0077 t),$$

$$A = 3,193 t (1 + 0,0075 t).$$

La valeur moyenne de A est de 3,192 t (1 + 0,0075 t), qui ne diffère des valeurs extrêmes que de un centième et demi.

Il résulte de toutes les expériences que nous venons de rapporter : 1° que la quantité de chaleur émise par le rayonnement, par unité de surface et dans l'unité de temps, l'excès de température étant constant, est indépendante de la forme et de la grandeur des corps, et que pour une enceinte qui diffère peu de 12° et des excès de température compris entre 25° et 65°, cette quantité est représentée par la formule

$$R = Kt (1 + 0,0056 t);$$

2° que la quantité de chaleur émise par l'air, dans les mêmes circonstances, est indépendante de la nature de la surface du corps, de la température absolue de l'enceinte, et que dans les mêmes limites d'excès de température, elle est représentée par la formule

$$A = K't (1 + 0,0075 t);$$

3° que la valeur de K' dépend de la forme et de la grandeur du corps.

Les deux premières lois avaient été données par Dulong ; mais, comme elles résultaient d'expériences faites sur le refroidissement de simples thermomètres, on pouvait douter qu'elles fussent applicables à des vases de différentes formes et renfermant de grandes masses d'eau.

Quand j'ai fait ces expériences, je pensais que les formules de Dulong n'étaient point exactes; cependant, comme j'avais reconnu l'exactitude d'un grand nombre de faits découverts par cet habile physicien, j'ai voulu voir jusqu'à quel point les résultats de mes expériences s'accordaient avec les formules en question.

Pour une température de l'enceinte de 12° , et dans les limites d'excès de température que je viens d'indiquer, nous avons vu que le refroidissement dû au rayonnement était représenté par la formule, $R = Kt(1 + 0,0056 t)$; or, si on prend successivement pour t , les nombres 25, 35, 45, 55, 65, on obtient pour R les valeurs suivantes :

$$K. 28,50; K. 41,86; K. 56,34; K. 71,94; K. 88,66.$$

D'après Dulong, la vitesse du refroidissement dû au rayonnement est donnée par la formule, $R = ma^{\theta}(a^t - 1)$; dans laquelle, $a = 1,077$, θ représente la température de l'enceinte, et t l'excès de température du corps sur celle de l'enceinte. Si dans cette formule on prend $\theta = 12$, et si on donne successivement à t les valeurs précédentes, on trouve pour R :

$$m. 0,230; m. 0,337; m. 0,451; m. 0,574; m. 0,708.$$

En égalant les valeurs de R , qui correspondent aux mêmes valeurs de t , on trouve pour m les valeurs suivantes :

$$123,91 . K; 124,21 . K; 124,92 . K; 125,33 . K; 125,22 . K,$$

dont la moyenne est $124,72 . K$, qui ne diffère de la plus grande et de la plus petite que de 4 et de 6 millièmes de leurs valeurs, différence plus petite que les erreurs probables des expériences.

Relativement au refroidissement provenant du contact de l'air, nous avons trouvé la formule, $A = K't(1 + 0,0075 t)$. Pour des excès de température de 25, 35, 45, 55, 65 degrés, on obtient pour A les valeurs suivantes :

$$K'. 29,69; K'. 44,19; K'. 69,19; K'. 77,68; K'. 96,69.$$

La formule de Dulong, pour le refroidissement par l'air sous une pression constante, est, $A = nt^4$; en substituant dans cette formule, les mêmes valeurs de t que précédemment, on trouve pour A

$$n. 52,92; n. 80,14; n. 109,12; n. 139,91; n. 175,14.$$

En égalant les valeurs de A , qui correspondent aux mêmes valeurs de t , on trouve pour n :

$$0,551 . K'; 0,551 . K'; 0,551 . K'; 0,555 . K'; 0,552 . K',$$

dont la moyenne est $0,552$, qui ne diffère de la plus grande et de la plus petite que de $0,004$ et de $0,002$ de leurs valeurs.

Ainsi, toutes mes expériences s'accordent parfaitement avec les formules de Dulong. D'après cela, je regarde comme très-probable que ces formules seraient encore exactes pour d'autres excès de température et d'autres valeurs de celle de l'enceinte, cette dernière étant toujours couverte d'un enduit terne.

Ces formules pour l'air et sous la pression atmosphérique seraient alors

$$R = 124,72 \cdot K a^0 (a^t - 1), \text{ et } A = 0,552 \cdot K' t^{1,233}.$$

Reste maintenant à déterminer les constantes relatives au rayonnement et au contact de l'air.

Détermination des coefficients de rayonnement.

Nous désignerons désormais sous le nom de coefficient de rayonnement la valeur de K dans l'expression $R = Kt (1 + 0,0056 t)$.

D'après les expériences que nous avons rapportées précédemment, on a, pour le cuivre jaune poli, $K = 0,26$; pour le papier blanc, $K = 3,77$; pour le noir de fumée, $K = 4,01$.

Pour déterminer le coefficient de rayonnement du ferblanc, de la tole et de la fonte, j'ai employé des cylindres de ces métaux, remplis d'eau, ayant à peu près $0^m,20$ de hauteur et $0^m,10$ de diamètre, dont j'ai observé le refroidissement. En retranchant du résultat de l'observation le refroidissement dû au contact de l'air, qui était connu par les expériences rapportées précédemment, le reste représentait le refroidissement dû au rayonnement. J'ai trouvé ainsi pour le ferblanc, $K = 0,42$, pour la tôle $K = 2,30$: mais ce dernier nombre doit varier avec l'épaisseur de la couche d'oxyde qui la recouvre toujours. Des expériences réitérées faites sur un cylindre de fonte, dont la surface était oxydée, ont donné pour la valeur de K , $3,36$.

Pour le papier, les étoffes et les matières en poudre, j'ai employé un cylindre de ferblanc, plein d'eau, recouvert successivement de ces différentes matières. Le refroidissement n'a été observé que pendant 4 degrés consécutifs, de manière à obtenir la vitesse du refroidissement à peu près pour un excès de température de 48^0 , et j'ai calculé exactement la vitesse à 48^0 , en supposant, que dans de petits intervalles, le refroidissement suivait la loi de Newton. Dans toutes ces expériences, la température de l'enceinte n'a varié que de 11^0 à $11^0,48$. Pour les matières en poudre, le cylindre était recouvert d'une couche mince de colle sur laquelle on appliquait la matière en poudre jusqu'à ce qu'elle en fût bien recouverte.

Avant de tirer aucune conséquence de ces expériences, il fallait vérifier si les épaisseurs des matières placées sur le cylindre étaient sans influence. Pour cela, j'ai observé la vitesse du refroidissement du même vase recouvert successivement de 1, 2, 3, 4 feuilles de papier, et j'ai obtenu exactement les mêmes vitesses de refroidissement pour les mêmes excès de température et la même température de l'enceinte.

Ainsi, j'aurais pu déduire de ce mode d'expérience les pouvoirs rayonnants des matières employées, mais cette méthode a deux inconvénients graves: les erreurs d'observation produisent des erreurs beaucoup plus grandes sur le rayonnement, et les expériences sur les cylindres verticaux dont les bouts sont libres sont difficiles à exécuter, car, pour peu que le cylindre ne soit pas parfaitement vertical, la marche de l'air est changée et par suite le coefficient de refroidissement. Pour toutes ces raisons, j'ai préféré observer directement le rapport des rayonnements de tous les corps. Cependant il résulte des expériences faites sur les cylindres un fait important: c'est que la couleur du papier, des étoffes de coton, de laine et de soie est sans influence sensible sur leur rayonnement.

Voici le mode d'expérience qui m'a paru le plus avantageux. Deux vases métalliques, terminés d'un côté par une surface plane, verticale, nue ou couverte de différentes matières, sont placés de manière que leurs surfaces planes soient parallèles, et à des distances égales des extrémités d'une pile thermo-électrique, en communication avec un rhéomètre très-sensible; l'appareil est disposé de manière que les surfaces des vases soient en regard de surfaces ternes à la température ambiante. L'une des surfaces est maintenue à une température constante, et on fait varier la température de l'autre jusqu'à ce que les effets produits sur les deux faces de la pile soient les mêmes, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'aiguille du rhéomètre reste au 0. Alors, en désignant par R et R' les pouvoirs rayonnants des deux surfaces, par t et t' les excès de leurs températures sur celle θ de la pile, par m un coefficient constant, et par a le nombre 1,0077, on a, d'après Dulong, pour les quantités de chaleur rayonnées, $mRa^{\theta}(a^t - 1)$, et $mR'a^{\theta}(a^{t'} - 1)$ ¹, et, comme ces quantités sont égales, quand le rhéomètre est au 0, on a

$$\frac{R}{R'} = \frac{a^t - 1}{a^{t'} - 1}$$

Le corps doué du plus faible pouvoir rayonnant était chauffé par la vapeur d'eau; l'autre, par de l'eau dont on faisait varier la température. Comme l'appareil dont je me suis servi a été employé à la détermination des coefficients de transmission à travers les corps mauvais conducteurs, pour éviter des répétitions inutiles, je ne le décrirai que quand il sera question de cette transmission. Je dirai seulement que la température de la vapeur n'a point été déterminée par la hauteur du baromètre, mais par un thermomètre entièrement plongé dans la vapeur, attendu que sa température dépend de l'activité du foyer, de la grandeur de l'orifice d'écoulement dans l'air et de la quantité de vapeur condensée. Je rapporterai d'abord les résultats des observations.

Laiton poli, 101^o,23; noir de fumée, 16^o,99; pile, 8^o,60.

Rapport du rayonnement du noir de fumée à celui du laiton, 15,3.

Rayonnement du laiton (page 136)..... 0,26

Rayonnement du noir de fumée..... 4,01

Noir de fumée, 93^o,59; papier blanc, 100^o,93; pile, 14^o,4.

² Rayonnement du papier, 0,901.4,01 = 3,73

Laiton, 71^o,52; ferblanc, 100^o,26; pile, 13^o.

Rayonnement du ferblanc = 1,68. 0,26 = 0,44

1. La formule de Dulong est $ma^{\theta}(a^t - 1)$; mais le coefficient m renferme implicitement, comme facteurs, l'étendue de la surface du corps et le pouvoir rayonnant de cette surface. Il ne faudrait pas prendre à la lettre l'expression *pouvoir rayonnant*, parce que le refroidissement qui ne provient pas du contact de l'air, résulte du rayonnement du corps et de celui de l'enceinte, de leurs pouvoirs réflecteurs et de leurs pouvoirs absorbants. Il est probable que la formule de Dulong n'est pas aussi générale qu'il le supposait, mais je pense que pour des enceintes à surfaces ternes, ce qui a toujours lieu dans la pratique, elle représente suffisamment bien les faits (voir mon *Traité de Physique*, t. I^{er}, p. 432).

2. Les expériences par le refroidissement ont donné 3,77, l'erreur est à peu près de 1 pour 100.

Zinc, 100°,19 ; laiton, 99°,79 ; pile, 15°,5. Rayonnement du zinc, 1,01 . 0,26 =	0,262
Tôle plombée, 100°,37 ; papier, 32°,24 ; pile, 12°,2. Rayonnement de la tôle plombée = 0,172 . 3,73 =	0,641
Étain en feuilles, 100°,62 ; papier, 20,015 ; pile, 13°. Rayonnement de l'étain = 0,57 . 3,73 =	0,212
Tôle ordinaire, 100°,63 ; noir de fumée, 79°,09 ; pile, 12°,4. Rayonnement de la tôle, 0,69 . 4,01 =	2,77
Tôle polie, 100°,56 ; noir de fumée, 25°,66 ; pile, 10°,06. Rayonnement de la tôle polie, 0,113 . 4,01 =	0,453
Fonte neuve, 100°,96 ; noir de fumée, 87°,18 ; pile, 10°,06. ¹ Rayonnement de la fonte neuve, 0,79 . 4,01 =	3,17
Papier argenté, 100°,67 ; noir de fumée, 13°,01 ; pile, 9°,5. Rayonnement du papier argenté, 0,104 . 4,01 =	0,417
Plaque de cuivre rouge poli, 101°,18 ; papier blanc, 13°,26 ; pile, 7°,40. Rayonnement du cuivre rouge, 0,0437 . 3,73 =	0,163
Plaque de cuivre rouge poli, 100°,5 ; papier blanc, 12°,66 ; pile, 6°,8. Rayonnement du cuivre, 0,0437 . 3,73 =	0,163
Cuivre argenté poli, 100°,4 ; papier blanc, 16°,66 ; pile, 12°,4. Rayonnement de l'argent poli, 0,0342 . 3,73 =	0,13
Cuivre argenté poli, 99°,9 ; papier blanc, 16°,66 ; pile, 11°,80. Rayonnement de l'argent poli, 0,039 . 3,77 =	0,14
Papier doré, 100°,3 ; papier blanc, 19°,33 ; pile, 11°,70. Rayonnement du papier doré, 0,0617 . 3,73 =	0,23
Verre, 100°,64 ; noir de fumée, 81°,69 ; pile, 11°,9. Rayonnement du verre, 0,727 . 4,01 =	2,91
Étoffe de laine mince, 100°,68 ; noir de fumée, 94°,79 ; pile, 16°,2. Rayonnement de la laine, 0,919 . 4,01 =	3,68
Calicot, 100°,51 ; noir de fumée, 94°,70 ; pile, 13°,5. Rayonnement du calicot, 0,91 . 4,01 =	3,65
Étoffe de soie, 100°,62 ; papier, 99°,76 ; pile, 13°. Rayonnement de la soie, 0,986 . 3,73 =	3,68
Craie en poudre sur papier (étendue avec le doigt), 100°,87 ; noir de fumée, 89°,46 ; pile, 14°,4. Rayonnement de la craie, 0,827 . 4,01 =	3,32
Poussière de bois très-fine, sur papier, 100°,62 ; noir de fumée, 92°,84 ; pile, 12°,8. Rayonnement de la poussière de bois, 0,881 . 4,01 =	3,53
Charbon en poudre très-fine, 101°,15 ; noir de fumée, 91°,25 ; pile, 11°,4. Rayonnement du charbon, 0,853 . 4,01 =	3,42

1. Les expériences par le refroidissement sur la fonte oxydée ont donné 3,36.

Sable très-fin, sur papier, 100°,65 ; noir de fumée, 94°,20 ; pile, 11°,0.	
Rayonnement du sable, 0,902.4,01 =	3,62
Peinture à l'huile, 100°,20 ; papier, 99°,26 ; pile, 7°,10.	
Rayonnement de la peinture, 0,985.3,73 =	3,67
Papier blanc, 18°,33 ; papier mouillé, 15°,4 ; pile, 11°,6.	
Rayonnement du papier mouillé, 1,41.3,73 =	5,25
Papier blanc, 16°,57 ; eau gommée, 15°,2 ; pile, 10°,4.	
Rayonnement de l'eau gommée, 1,29.3,73 =	4,81
Fer-blanc, 101°,16 ; papier huilé (une seule feuille), 17°,44 ; pile, 10°,4.	
Rayonnement du papier huilé, couche mince, 18,11.0,44 =	7,96
Fer-blanc, 100°,43 ; papier huilé (3 feuilles), 16°,84 ; pile, 8°,2.	
Rayonnement du papier huilé, couche épaisse, 15,01.0,44 =	6,60
Papier blanc, 100°,75 ; papier huilé (3 feuilles mieux imbibées), 81°,98 ; pile, 9°,90.	
Rayonnement du papier huilé, couche plus épaisse, 1,364.3,73 =	5,08

Il résulte de ces expériences et de celles qui ont été faites sur le cylindre de fer-blanc recouvert de différents enduits : 1° que les matières ternes, quelle que soit leur couleur, ont à peu près le même pouvoir émissif, mais que le noir de fumée, déposé sur du papier par la flamme d'une chandelle, l'emporte notablement ; 2° que le pouvoir émissif de l'eau et surtout celui de l'huile sont plus considérables que celui du noir de fumée. A ce sujet, il est important de remarquer que l'épaisseur du liquide, quand elle dépasse celle qui correspond au maximum de rayonnement, tend à diminuer le rayonnement apparent, parce que la surface du liquide est à une température moins élevée que le vase plein d'eau et qu'on prend par conséquent pour le liquide une température trop élevée, ce qui donne par la formule un rayonnement trop faible ; c'est ce que confirment les trois expériences faites sur l'huile.

J'ai constaté par plusieurs expériences qu'il faut, ainsi qu'on l'avait déjà reconnu, une certaine épaisseur de matière pour obtenir le maximum de rayonnement, je rapporterai seulement les résultats des expériences faites sur un cylindre de cuivre, qui a été successivement recouvert de 1, 2, 3, 4 couches de noir de fumée ; pour le même excès de température et la même température de l'enceinte, les vitesses du refroidissement ont été 0,0049 ; 0,0053 ; 0,0055 ; 0,0058. J'ai dû m'arrêter là, dans la crainte d'obtenir un accroissement d'effet résultant de l'accroissement de surface. Le pouvoir rayonnant correspondant à la dernière vitesse était encore inférieur au pouvoir rayonnant du noir de fumée. Dans toutes les expériences, le noir de fumée a été appliqué sur du papier, et une seule couche a toujours donné le maximum d'effet.

Pour déterminer le pouvoir rayonnant du marbre poli, j'ai observé le refroidissement d'un cylindre de marbre plein d'eau, isolé par les deux bouts avec du coton, quand la surface du vase était nue ou couverte de papier. Dans les mêmes circonstances, la durée du refroidissement a été de 17',25" dans le premier cas, et de 17',21" dans le second. Ainsi on peut considérer le rayonnement du marbre comme différent peu de celui du papier.

Des expériences analogues, faites sur des cylindres de pierre, de bois de sapin, de bois de chêne et de bois de noyer, ont donné à peu près les mêmes résultats ¹.

Lorsqu'un vase est environné de plusieurs enceintes assez éloignées les unes des autres pour que l'air se meuve facilement dans l'intervalle qui les sépare, le refroidissement du vase décroît très-rapidement avec le nombre des enveloppes et suivant une loi qui est assez bien représentée par la formule [13] (page 102). Mais quand les enveloppes sont très-rapprochées, il n'en est plus ainsi; la vitesse du refroidissement décroît très-lentement avec le nombre des enveloppes. Les expériences ont été faites avec un cylindre de fer-blanc couvert de papier, et isolé par les deux bouts, au moyen de deux cylindres de papier qui formaient les prolongements de sa surface et qui renfermaient du coton très-divisé. Sa surface a été recouverte successivement de 1, 2, 3, 4 feuilles de papier maintenues à une distance de un demi-millimètre les unes des autres. Pour cela on fixait à chaque extrémité du cylindre de fer-blanc une bande de carton mince de 3 millimètres de largeur, sur lesquelles on collait les bords supérieurs et inférieurs de la nouvelle enveloppe de papier. Dans toutes les expériences, on a constamment observé la vitesse pour un même excès de température de 48°; la température de l'enceinte n'a pas changé sensiblement; la surface totale du vase était de 0^m,1014, et celle de la partie cylindrique était de 0^m,0789. Voici les résultats obtenus :

Cylindre couvert de papier; refroidissement par la surface totale.	$\nu = 0,00580$
Cylindre isolé par les deux bouts.	$\nu = 0,00464$
— une enveloppe.	$\nu = 0,00436$
— deux enveloppes.	$\nu = 0,00355$
— trois enveloppes.	$\nu = 0,00313$
— quatre enveloppes.	$\nu = 0,00263$

On voit, à l'inspection des quatre derniers nombres, que la loi du refroidissement, pour les enveloppes très-éloignées les unes des autres, n'est point applicable aux enveloppes très-rapprochées; car, dans la dernière expérience, la vitesse n'est pas diminuée de moitié, tandis qu'elle aurait dû être réduite à $\frac{1}{4}$, si la loi des enveloppes très-espacées avait eu lieu.

1. MM. Laprevotaye et Dessins ont déterminé les rapports des pouvoirs émissifs de l'argent pur dans différents états, du platine, de l'or, et du cuivre, à celui du noir de fumée, par deux méthodes différentes qui ont donné les mêmes résultats. Dans toutes les deux, les plaques chauffées à la même température ou à des températures différentes, agissaient successivement sur une des extrémités d'une pile thermo-électrique en communication avec un rhéomètre, et c'est par les déviations de l'aiguille, en les supposant proportionnelles aux intensités des faisceaux de chaleur rayonnante, que ces physiciens ont trouvé les rapports en question (*Annales de Chimie et de Physique*, t. XXII). Les seuls nombres qui se rapportent à mes expériences sont les suivants :

Argent pur bruni.	0,025
Cuivre en lames.	0,049
Or en feuilles.	0,0428
J'ai trouvé, pour l'argent poli (cuivre plaqué).	0,034
» pour le cuivre poli.	0,040
» pour le papier doré.	0,037.

Les différences de ces résultats proviennent probablement de la différence de nature et d'état des corps.

A la vérité, il y avait un accroissement notable de surfaces à peu près de 0,1, ce qui réduirait la dernière vitesse à 0,00237; mais ce chiffre est encore beaucoup plus considérable que celui qui correspond à la loi en question et qui serait de 0,00116. Quant j'ai fait ces expériences, je croyais obtenir un décroissement de vitesse beaucoup plus rapide que le rapport inverse du nombre des enveloppes, attendu que l'air ne pouvant pas se mouvoir facilement dans des espaces étroits, je pensais que la transmission de la chaleur n'aurait lieu que par le rayonnement, mais je n'avais pas tenu compte de la transmission de la chaleur par l'air stagnant, qui est beaucoup plus grande qu'on ne serait tenté de le supposer (voir page 103).

Détermination du coefficient de refroidissement dû au contact de l'air.

Il résulte des expériences que nous avons rapportées, que la loi du refroidissement des corps par le contact de l'air est indépendante de la forme du corps et de la température de l'enceinte; que, pour des excès de température compris entre 25° et 65°, la quantité de chaleur transmise par mètre carré et par heure est représentée par la formule $A = K't(1 + 0,0075 t)$; que, pour d'autres excès de température, elle est représentée, d'après Dulong, par cette autre formule, $A = nt^{4,233}$, pour laquelle $n = 0,55 K'$: dans toutes les deux, t représentant l'excès de température du corps sur celle de l'enceinte. Mais nous avons vu, en même temps, que la valeur de K' , et par conséquent celle de n , changent avec la forme et la grandeur du corps.

Les phénomènes qui se produisent dans la transmission de chaleur par l'air sont très-complicés; l'air, après s'être échauffé sur les parties inférieures du corps, s'élève autour de sa surface en s'échauffant toujours davantage et en produisant un appel d'air extérieur, résultant des variations de vitesses ascensionnelles par suite des variations de température; en outre, il est certain, comme nous le verrons plus tard, que le refroidissement ne provient pas uniquement du contact de l'air avec la surface du corps, mais aussi d'une transmission directe à travers l'air à mesure qu'il se déplace. On conçoit facilement, d'après cela, qu'il serait impossible d'arriver, par des considérations théoriques, à des formules générales qui représenteraient les valeurs moyennes de K' pour tous les cas qui peuvent se présenter. J'ai cherché, par de nombreuses expériences, des formules qui représentent, au moins d'une manière approchée, les valeurs de K' pour les corps sphériques et des cylindres placés horizontalement ou verticalement; ces deux derniers cas étant les seuls qui se rencontrent dans les applications.

Vases sphériques. Nous avons trouvé précédemment que pour trois sphères, dont les rayons étaient 0^m,0746; 0^m,1058; 0^m,1538; les coefficients de refroidissement par l'air étaient 3,52; 3,00; 2,63. Ces résultats peuvent être représentés par la formule

$$K' = 1,778 + \frac{0,13}{r} \quad [a];$$

car cette formule donne pour les trois sphères, les nombres 3,52; 3,00; 2,62.

Cylindres horizontaux. Pour déterminer la transmission de la chaleur par l'air sur des cylindres horizontaux, je me suis servi de différentes méthodes.

J'ai d'abord employé deux cylindres de laiton poli, ayant 0^m,102 et 0^m,138 de diamètre, 0^m,135 et 0^m,115 de longueur, terminés à chaque extrémité par une demi-sphère; ils étaient garnis chacun de deux agitateurs disposés comme pour des sphères, et pourvus d'un thermomètre placé au milieu (pl. 7, fig. 17 et 18); chacun d'eux a été introduit dans l'enceinte à température constante, et la vitesse du refroidissement a été observée par les méthodes indiquées précédemment.

Pour le premier vase, on avait $P = 1^k,618$; la surface du cylindre, y compris les douilles et les pieds, était de 0^m,0462; la surface de la sphère était de 0^m,0326. J'ai trouvé pour la vitesse du refroidissement, $\nu = 0,0000503 t (1 + 0,0073 t)$. Alors la quantité totale de chaleur M , perdue par heure, était

$$M = \nu \cdot 3600 \cdot 1,618 = 0,2930 t + 0,00214 t^2.$$

La quantité de chaleur émise par le rayonnement était

$$0,25 \cdot 0,0788 t (1 + 0,0056 t) = 0,0197 t + 0,00011 t^2.$$

En retranchant cette quantité de M , on trouve $0,273 t + 0,00203 t^2$ pour la chaleur perdue par le contact de l'air. Or, la quantité de chaleur perdue par le contact de l'air sur les deux demi-sphères, calculée par la formule (a) est égale à $0,141 t + 0,00103 t^2$. Par conséquent, le refroidissement dû au contact de l'air sur la partie cylindrique du vase s'obtiendra en retranchant cette dernière quantité de celle qui représente le refroidissement par l'air sur la surface totale; on trouve ainsi,

$$0,132 t + 0,00100 t^2 = 0,132 t (1 + 0,0075 t),$$

et en divisant cette expression par la surface du cylindre, 0^m,0462, on obtient :

$$A = 2,86 t (1 + 0,0075 t).$$

Pour le second vase on avait $P = 3^k,308$; la surface du cylindre, y compris les pieds et les douilles, était de 0^m,0700; celle de la sphère était de 0^m,0598. On a trouvé

$$M = 3,308 \cdot 3600 \cdot 0,0000365 t (1 + 0,0073 t) = 0,434 t + 0,00316 t^2.$$

La perte totale par le rayonnement était

$$0,25 \cdot 0,1297 t (1 + 0,0056 t) = 0,0324 t + 0,0001815 t^2.$$

La perte par l'air sur la sphère était, $0,2185 t + 0,001595 t^2$. En retranchant la seconde expression de la première, on trouve $0,184 t + 0,00139 t^2$, et par suite

$$A = 2,63 t (1 + 0,0076 t).$$

J'ai répété ces expériences en recouvrant la partie cylindrique des deux vases avec du papier blanc; en retranchant de la valeur de M , le refroidissement de la sphère et celui du cylindre dû au rayonnement, j'ai obtenu des résultats fort peu différents de ceux que je viens de rapporter.

Pour observer le refroidissement par l'air sur des cylindres d'un plus petit diamètre, j'ai employé 3 cylindres de fer poli, ayant pour longueur 0^m,10; 0^m,20; 0^m,40; un même diamètre de 0^m,032; terminés par des calottes sphériques; remplis de mercure et placés horizontalement dans l'enceinte à température constante; les deux parties de l'appareil étaient un peu écartées, pour laisser passer les tiges des thermomètres.

Dans ces expériences il y a une cause d'erreur dont il est important d'examiner l'influence. Quand un thermomètre est placé verticalement, le réservoir est soumis à une pression égale à la hauteur du mercure dans la tige, et cette pression disparaît complètement quand il est placé horizontalement; ainsi, dans les mêmes circonstances, le thermomètre placé horizontalement doit indiquer une température plus élevée que quand il est vertical. Pour estimer cette différence, remarquons que la compression du mercure pour une atmosphère est de 0,000055, celle du verre de 0,000033, et que, dans le cas dont il s'agit, l'effet produit est la somme des effets produits sur le mercure et sur le verre: ainsi il est de 0,000088; or la dilatation du mercure dans le verre, pour 1 degré est de $\frac{1}{6480} = 0,0001543$, et le rapport $0,000088 : 0,0001543 = 0,57$. Ainsi, si la colonne de mercure avait 0,76 de hauteur, la différence des températures, indiquées par le même instrument dans ces deux positions, serait de 0°,57, et elle diminuerait à mesure que la colonne serait moins élevée. Je n'ai point eu égard à ces corrections qui sont de l'ordre des erreurs inévitables dans ces sortes d'expériences.

Les valeurs de M obtenues par ces 3 cylindres ont été,

$$M = 0,072 t(1 + 0,0073 t) \dots M = 0,123 t(1 + 0,0073 t) \dots M = 0,222 t(1 + 0,0073 t).$$

Si on retranche la première de la seconde, la seconde de la troisième et la première de la troisième, on obtiendra le refroidissement sur une longueur de 0^m,10; de 0^m,20; de 0^m,30; on trouve ainsi pour 0^m,10 ces trois valeurs 0,051; 0,0495; 0,050. En admettant 0,050, comme la surface cylindrique est de 0^m,0105, on obtient, pour la quantité de chaleur transmise par mètre carré et par heure, $4,76 t(1 + 0,0073 t)$; et, comme la quantité de chaleur transmise par le rayonnement du fer poli est, $0,31 (1 + 0,0056 t)$, on trouve pour le refroidissement dû à l'air,

$$A = 4,45 t(1 + 0,0074 t).$$

J'ai ensuite employé deux cylindres de fer blanc de 0^m,20 de diamètre et de 0^m,10, et 0^m,20 de hauteur, couverts de papier et placés horizontalement.

$$\text{Le premier a donné } M = 1,240 t(1 + 0,0065 t).$$

$$\text{Le second, } \dots \dots M' = 0,850 t(1 + 0,0065 t).$$

La différence, $M - M' = 0,390 t(1 + 0,0065 t)$, représente le refroidissement sur une longueur de 0^m,10; la surface de ce cylindre étant 0^m,0628, le refroidissement par unité de surface est égal à, $6,21 t(1 + 0,0065 t)$; et le refroidissement provenant du rayonnement étant égal à, $3,77 t(1 + 0,0056 t)$, il s'ensuit que le refroidissement provenant de l'air est représenté par, $2,44 t(1 + 0,0078 t)$.

Ainsi, pour des cylindres horizontaux ayant pour rayons 0^m,016; 0^m,051; 0^m,069; 0^m,10, les quantités de chaleur perdue, par mètre carré, par heure, et pour une différence de température de 1 degré, sont 4,45; 2,86; 2,63 et 2,44.

Ces nombres sont représentés d'une manière satisfaisante par la formule,

$$A = 2,058 + \frac{0,0382}{r};$$

car, pour les rayons des cylindres employés, on trouve, 4,45; 2,81; 2,61 et 2,44.

Cylindres verticaux. Pour les cylindres verticaux, il y avait à examiner l'influence de la hauteur et celle de la section; et ici se présentait une grande difficulté. Les vases sont toujours terminés par les deux bouts, et il fallait supprimer, dans les résultats des expériences, le refroidissement provenant de ces deux extrémités. Il est d'abord important de remarquer que ce refroidissement par les bouts, pour la même étendue de surface, est beaucoup plus petit que pour la partie latérale du cylindre; en effet, à la partie inférieure, en la supposant parfaitement horizontale, l'air ne s'y renouvellerait que très-lentement, il s'y établirait des couches d'air à température croissante de haut en bas, et la transmission de la chaleur n'aurait presque lieu qu'à travers de l'air immobile; à la partie supérieure, le même mode de transmission a encore lieu; mais, comme les couches d'air, inégalement chaudes, ne sont pas en équilibre stable, il se forme des courants en sens contraires qui renouvellent l'air en contact avec la surface. Le refroidissement par les bouts du cylindre, quoique faible, comme je m'en suis d'ailleurs assuré par des expériences directes, ne pouvait pas être négligé; je n'ai trouvé aucun moyen de le mesurer exactement, mais j'ai employé une disposition qui le rend très-faible et réellement négligeable. J'ai reconnu, par des expériences très-nombreuses faites par plusieurs procédés différents, que la conductibilité du coton était indépendante de sa densité, du moins dans des expériences qui ont donné les mêmes résultats, la densité de cette matière a varié de 0,007 à 0,7. Ainsi un mélange d'air et de coton, dans une proportion quelconque, possède la même conductibilité, ce qui ne peut s'expliquer qu'en admettant que la conductibilité de l'air en repos soit égale à celle de la matière textile du coton. Il résulte de là que, si on prolonge un cylindre métallique vertical, en dessus et en dessous, par des cylindres de papier remplis de coton cardé ou d'édredon, le refroidissement aura lieu comme si ces cylindres étaient remplis d'air immobile; en outre, on peut regarder comme complètement nul le refroidissement par le cylindre supérieur, parce qu'il est environné d'air qui s'est échauffé contre le cylindre métallique.

Influence de la hauteur. Pour observer l'influence de la hauteur sur les cylindres verticaux, j'ai employé deux groupes de cylindres de 0^m,10; 0^m,20; 0^m,40 et 0^m,60 de hauteur et de 0^m,032 de diamètre; le premier groupe était formé de tuyaux de fer étirés à surface polie, terminés par des calottes sphériques et remplis de mercure; le mercure n'y était point agité et le thermomètre était placé dans l'axe du cylindre. Dans l'autre système, les tubes étaient en laiton de mêmes diamètres et de mêmes hauteurs que ceux de fer; ils étaient remplis d'eau et renfermaient un agitateur disposé comme dans les cylindres d'un grand diamètre, mais dont l'axe de rotation était placé à côté de l'axe du cylindre, afin de laisser une place libre pour le réservoir du thermomètre; les fig. 10 et 11 (pl. 7) représentent, la première, une coupe verticale d'un des cylindres, et la seconde une coupe horizontale. Les cylindres de fer étaient simplement suspendus dans l'enceinte à température constante, mais ceux de cuivre étaient fixés dans des châssis par des tiges de bois de sapin très-minces, afin d'éviter les mouvements des vases par suite de celui qu'on imprime à l'axe de rotation de l'agitateur. Les fig. 12 et 13 représentent la disposition de l'appareil.

Les deux cylindres de fer de 0^m,10 et 0^m,20 de hauteur ont donné des résultats régu-

liers qui s'accordent très-bien avec les formules qui représentent les vitesses de refroidissement des autres vases; mais, pour ceux d'une plus grande hauteur, les valeurs de m , $\nu:(1 + 0,0073 t)$ au lieu d'être constantes, allaient en croissant à mesure que la température s'abaissait; pour faire disparaître cette anomalie, j'ai remplacé le thermomètre par un autre ayant un plus long réservoir, $0^m,20$; les variations sont devenues plus petites, mais elles étaient encore trop grandes pour qu'il fût permis de douter que dans ces cylindres la conductibilité du mercure n'était pas suffisante pour maintenir l'égalité de température dans toute la longueur. Voici du reste les résultats obtenus avec le cylindre de $0^m,40$ et le thermomètre à long réservoir; pour des excès de température de 74° , 63° , 34° , les valeurs de m ont été de $0,000204$; $0,000222$, $0,000240$. D'après cela, j'ai renoncé à l'usage des cylindres de fer, dont la hauteur excédait $0^m,20$.

Les cylindres de cuivre pleins d'eau ont tous donné des résultats fort réguliers, et pour les hauteurs $0^m,10$; $0^m,20$; $0^m,40$; $0^m,60$, j'ai trouvé pour les valeurs de K' les nombres suivants : $5,20$; $4,42$; $4,00$; $3,45$.

Ces nombres sont sensiblement représentés par la formule

$$K' = 2,43 + \frac{0,8758}{\sqrt{h}};$$

car, pour les hauteurs désignées, elle donne $5,20$, $4,38$; $3,81$ et $3,45$.

Cette formule ne peut être considérée que comme une approximation peu précise, car elle ne s'accorde réellement qu'avec les valeurs extrêmes; mais on ne pouvait pas espérer une grande exactitude dans ces sortes d'expériences, car les erreurs inévitables dans la détermination de la vitesse du refroidissement en produisent de plus grandes encore dans l'estimation du refroidissement provenant de l'air. Mais, un fait bien établi, c'est le décroissement de la valeur de K' à mesure que le cylindre augmente de hauteur; on le comprend d'ailleurs aisément, en remarquant que l'air s'échauffe toujours davantage à mesure qu'il s'élève. On est même étonné qu'il ne soit pas plus rapide, mais deux causes interviennent pour ralentir le décroissement; la première consiste dans la transmission directe de la chaleur de l'air en contact avec la surface du cylindre à l'air environnant; la seconde provient de ce que l'air, en s'élevant, tend à prendre des vitesses de plus en plus grandes et qu'il appelle l'air environnant.

Les cylindres dont je me suis servi avaient à peu près $0^m,1$ de circonférence, et, par conséquent, chaque décimètre de hauteur avait une surface égale à $0^m,01$; on trouve alors, d'après la formule précédente, que pour des cylindres de $0^m,1$; $0^m,2$; $0^m,3$; $0^m,4$; $0^m,5$; $0^m,6$ de hauteur, les quantités de chaleur perdues par heure et pour un excès de température de 1 degré seraient

$$0,052; 0,0866; 0,1185; 0,1438; 0,1780; 0,2070,$$

et que les quantités de chaleur perdues par le 1^{er} , le 2^{e} , le 3^{e} , le 4^{e} , le 5^{e} et le 6^{e} décimètre de hauteur seraient

$$0,052; 0,0346; 0,0319; 0,0303; 0,0292; 0,0290;$$

ainsi, le décroissement d'effet diminue rapidement.

J'aurais bien désiré faire des expériences sur des tuyaux d'une plus grande hauteur; mais, comme on ne pouvait pas opérer dans l'air libre, il aurait fallu employer des enceintes à température constante d'une grande hauteur, et il aurait été difficile d'agiter le liquide de manière à y établir à chaque instant la même température dans tous les points.

Il résulte, de ce que nous venons de dire, que le même cylindre ne se refroidit pas avec la même vitesse quand il est horizontal et quand il est vertical. Pour un cylindre de 0^m,032 de diamètre, placé horizontalement, la quantité de chaleur transmise par mètre carré et par heure est de 4,45, et quand il est vertical, cette quantité, pour des hauteurs de 0^m,10; 0^m,20; 0^m,40; 0,60, est de, 5,20; 4,40; 4,00; 3,45.

Influence du diamètre. Pour reconnaître l'influence du diamètre des tuyaux, j'ai employé quatre cylindres de 0^m,20 de hauteur et de 0^m,032; 0^m,061; 0^m,115, 0^m,201 de diamètre, couverts de papier et isolés par les deux bouts; ces expériences ont donné pour la valeur de K', 4,38; 4,00; 3,90; 3,66; nombres qui sont assez bien représentés par la formule

$$K' = 3,181 + \frac{0,1515}{\sqrt{r}};$$

car, pour les rayons correspondants aux quatre cylindres, elle donne 4,38; 4,05; 3,81 et 3,66.

Pour des cylindres ayant des rayons de 0^m,005; 0^m,01; 0^m,10; 0^m,20; 0^m,30; 0^m,40; 0^m,50; 0^m,60, la formule donne 5,32; 4,69; 3,66; 3,52; 3,46; 3,42; 3,39; 3,37.

Ce décroissement dans la perte de la chaleur par l'air semble singulier, mais il est facile de s'en rendre compte. Cette perte ne provient pas uniquement du contact de l'air avec le corps, mais d'une transmission directe à travers l'air qui l'environne, puisque l'air conduit la chaleur. Or, cette transmission, pour chaque élément vertical du cylindre, a lieu dans un espace angulaire dont l'ouverture augmente à mesure que le rayon du cylindre diminue. C'est d'ailleurs ce qui résulte des formules relatives à la conductibilité de la chaleur à travers les enveloppes cylindriques. Il est très-probable que cette circonstance a une grande influence sur le refroidissement, par l'air, des cylindres placés horizontalement et des sphères.

La formule relative à l'influence de la hauteur suppose que les cylindres ont 0^m,016 de rayon, celle qui représente l'influence des rayons est relative à des cylindres de 0^m,20 de hauteur; mais il est facile d'en déduire le refroidissement d'un tuyau vertical d'une hauteur h et d'un rayon r , en admettant que l'influence de la hauteur soit indépendante du diamètre, supposition très-probable. En effet, la perte de chaleur pour un cylindre de 0^m,20 de hauteur et de 0^m,016 de rayon est de 4,38, celle d'un cylindre de même hauteur et d'un rayon r étant, $3,181 + \frac{0,1515}{\sqrt{r}}$, le refroidissement du même cylindre pour une hauteur h sera égal au rapport de cette dernière expression à 4,38, multipliée par l'expression $2,43 + \frac{0,875}{\sqrt{h}}$, ainsi on aura

$$K' = \left(3,181 + \frac{0,1515}{\sqrt{r}} \right) \left(2,43 + \frac{0,8758}{\sqrt{h}} \right) : 4,38,$$

$$\text{ou,} \quad K' = \left(0,726 + \frac{0,0345}{\sqrt{r}}\right) \left(2,43 + \frac{0,8758}{\sqrt{h}}\right).$$

Pour une surface plane, il faudrait faire r infini, et la valeur de K' deviendrait

$$K' = 1,764 + \frac{0,636}{\sqrt{h}}.$$

Ces deux dernières formules ne peuvent être considérées, surtout la dernière, que comme des approximations peu précises, parce qu'elles sont fondées sur d'autres formules qui ne représentent les faits que dans une étendue assez limitée. Mais, pour toutes les applications relatives au chauffage, elles sont bien suffisantes, attendu que, dans toutes les circonstances qui peuvent se présenter, les courants d'air et les vents produisent des anomalies bien autrement importantes que les erreurs qui peuvent résulter de l'emploi de ces formules.

§ 2. TRANSMISSION DE LA CHALEUR A TRAVERS LES CORPS MAUVAIS CONDUCTEURS.

Dans ces recherches, j'ai eu pour but de déterminer les coefficients de conductibilité des corps qui conduisent mal la chaleur, c'est-à-dire, les quantités d'unités de chaleur qui traverseraient dans une heure des plaques formées de ces substances, ayant un mètre carré de surface, un mètre d'épaisseur, et dont les surfaces seraient maintenues à des températures qui différeraient de 1 degré.

Les expériences ont été faites en employant ces corps sous différentes formes, dont les effets avaient été calculés d'après la loi élémentaire de la transmission de la chaleur. Je n'ai point fait d'expériences ayant eu pour objet spécial la vérification de cette loi, parce qu'elle est une conséquence nécessaire du mode de propagation de la chaleur.

Cette loi consiste, comme on sait, en ce que le flux de chaleur qui traverse un élément d'un corps dans l'unité de temps, est proportionnel à sa surface, à la différence de température des deux faces perpendiculaires au sens de la propagation et en raison inverse de l'épaisseur de l'élément. Cette loi, comme je viens de le dire, se déduit rigoureusement de la nature du mouvement de la chaleur. En effet, considérons une plaque très-mince, d'un corps homogène, ayant l'unité de surface; supposons que t représente la différence des températures des surfaces et que la quantité de chaleur qui passe à travers la plaque soit une fonction quelconque de t ; cette fonction étant continue et devenant nulle pour $t=0$, pourra toujours être développée suivant les puissances croissantes de t , et ce développement ne renfermera point de terme constant; mais alors, quand on suppose t infiniment petit, tous les termes peuvent être négligés par rapport au premier, par conséquent le flux de chaleur est déjà nécessairement proportionnel à l'excès de température. Remarquons maintenant que si les deux faces d'une plaque

d'une épaisseur finie sont maintenues chacune à une température constante, après un certain temps, lorsque le régime sera établi, le flux de chaleur qui traversera la plaque traversera en même temps chacune des lames élémentaires dont la plaque est composée, puisqu'il n'y a point de variations intérieures de température. Cela posé, considérons une lame très-mince dont les faces aient une différence de température dt ; si on imagine que l'épaisseur soit doublée, la différence des températures de ces surfaces restant la même, pour chacune des lames élémentaires, cette différence sera $dt:2$, et par conséquent la quantité de chaleur transmise sera deux fois plus petite; on trouverait de même, que si l'épaisseur de la lame devenait 3, 4, 5, 6 fois plus grande, la différence de température dt des deux surfaces extrêmes restant la même, la quantité de chaleur transmise par la lame deviendrait 3, 4, 5, 6 fois plus petite. Ainsi, la quantité de chaleur transmise, par unité de surface et pendant l'unité de temps, par une lame d'une épaisseur de et dont dt représente la différence de température des deux surfaces, est proportionnelle à $dt:de$, et peut être représentée par $Cdt:de$, C représentant une quantité constante.

Mais on ne peut pas savoir d'avance si le coefficient de conductibilité est réellement indépendant de la température, comme le calcul le suppose; aussi j'ai toujours employé, pour un certain nombre de corps, des épaisseurs différentes, non-seulement comme contrôle des expériences, mais comme vérification de l'hypothèse dont je viens de parler.

Dans mes premières recherches, j'avais employé des méthodes qui n'étaient pas assez exactes pour donner, dans tous les cas, des résultats suffisamment approchés. Dans celles-ci, je n'ai rien négligé pour approcher aussi près que possible de la vérité. J'ai employé trois méthodes différentes que je décrirai successivement.

PREMIÈRE MÉTHODE.

Cette méthode consiste à observer le refroidissement d'une enveloppe sphérique, pleine d'eau chaude, formée de la matière dont on veut déterminer la conductibilité, et qui est plongée dans de l'eau maintenue à une température constante. Avant de décrire l'appareil que j'ai employé, j'entrerai dans quelques détails sur les phénomènes qui se produisent et sur l'influence du refroidissement de l'enveloppe, influence qui complique beaucoup la question.

Imaginons deux sphères de cuivre mince, concentriques, plongées dans l'eau, la sphère intérieure pleine d'eau chaude constamment agitée et l'intervalle des deux sphères rempli de la matière dont on veut mesurer la conductibilité. Désignons par R le rayon de la sphère intérieure, par R' celui de la sphère extérieure, par V l'excès de la température de l'eau intérieure sur celle du bain, ou celle de l'eau intérieure, celle du bain étant 0° , par ν la température d'une couche sphérique dont le rayon est x .

En supposant V constant, ce qui aurait lieu si l'eau intérieure était constamment réchauffée de manière à compenser la chaleur transmise à travers l'enveloppe, les enveloppes sphériques élémentaires conserveront la même température, et toutes seront tra-

versées en même temps par la même quantité de chaleur. En désignant cette quantité par A , pour l'unité de temps, nous aurons

$$A = - C \cdot \frac{4\pi x^2 d\nu}{dx} \quad [1].$$

En effet, dans le cas dont il s'agit, la quantité de chaleur qui passe à travers une enveloppe élémentaire est proportionnelle à la conductibilité C de la matière, à sa surface $4\pi x^2$, à la différence de température $d\nu$ des deux faces, et en raison inverse de leur distance dx . Cette expression de la valeur de A , semble indépendante de la densité et de la capacité calorifique de la matière, mais ces éléments entrent implicitement dans la valeur de C . L'équation [1] donne

$$C d\nu = - \frac{A}{4\pi} \cdot \frac{dx}{x^2} \quad [2].$$

En intégrant cette équation entre les limites V et 0 pour ν , et R et R' pour x , on obtient

$$CV = \frac{A}{4\pi} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right); \quad A = \frac{4\pi C R R' V}{R' - R}; \quad \text{et,} \quad C = \frac{A}{4\pi} \cdot \frac{(R' - R)}{R R'} \cdot \frac{1}{V} \quad [3].$$

Cette dernière formule donne la valeur de C , en supposant, comme nous l'avons dit, que V soit constant et qu'on connaisse A . Elle ne pourrait servir qu'autant qu'on maintiendrait la température intérieure, par exemple au moyen d'un courant de vapeur, et qu'on mesurerait exactement la quantité de chaleur qu'elle fournit dans l'unité de temps qui est représentée par A . Mais comme ce mode d'expérience présenterait beaucoup de difficulté et d'incertitude, à cause, surtout, de l'eau entraînée mécaniquement par la vapeur, j'ai cherché à résoudre la question au moyen de la vitesse du refroidissement de l'eau renfermée dans la sphère intérieure.

Si la quantité de chaleur renfermée dans l'enveloppe était très-petite, relativement à celle qui se trouve dans l'eau de la sphère intérieure, il semble qu'on pourrait négliger la chaleur perdue par l'enveloppe; alors, en observant la durée du refroidissement de 1° pour un excès de température V , on déduirait du poids de l'eau, de celui de son enveloppe et de sa capacité calorifique, la valeur de A correspondante, et, par suite, celle de C . Mais ce mode de calcul, même pour des enveloppes d'un poids très-petit, ne donne pas, pour des sphères enveloppantes de rayons différents, des résultats concordants. J'ai cherché ensuite à tenir compte du refroidissement de l'enveloppe, en supposant que le régime ne changeait pas, c'est-à-dire qu'à chaque instant les températures des couches sphériques se succédaient suivant la même loi, et calculant de combien il fallait augmenter le poids de l'eau intérieure pour compenser le refroidissement de l'enveloppe; on trouve bien, par le calcul, que les quantités de chaleur perdues par chaque élément, pour prendre ces régimes successifs, s'écoulaient dans le même temps que si elles avaient à traverser l'enveloppe totale, parce que, pour chacune d'elles, l'accroissement de la distance à parcourir est exactement compensé par l'accroissement d'excès de température; mais les choses ne se passent pas ainsi, car ce mode de calcul conduit encore

à des valeurs de C fort inégales pour la même matière, quand on emploie des épaisseurs différentes. J'ai donc été obligé de résoudre la question, sans faire aucune supposition sur l'état variable de la température dans les enveloppes élémentaires.

Considérons une surface sphérique dont le rayon est x , la quantité de chaleur qui la traversera pendant un instant infiniment petit dt , sera $-4\pi x^2 C \frac{d\nu}{dx} dt$. La quantité de chaleur qui traversera la surface dont le rayon est $x + dx$, s'obtiendra en changeant dans cette expression x en $x + dx$, c'est-à-dire en y ajoutant sa différentielle par rapport à x . Remarquons maintenant que si l'on retranche la seconde expression de la première, la différence $4\pi C d\left(x^2 \frac{d\nu}{dx}\right) dt$, représentera la quantité de chaleur qui sera restée dans l'enveloppe élémentaire comprise entre les deux sphères dont les rayons sont x et $x + dx$; alors, si on divise cette quantité par le volume de cette enveloppe et par la capacité calorifique de la matière, on aura évidemment la variation de température qu'elle éprouve dans le temps dt (Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, p. 107); nous aurons donc

$$\frac{d\nu}{dt} = \frac{C}{c} d\left(\frac{x^2 \cdot \frac{d\nu}{dx}}{x^2 dx}\right) = \frac{C}{c} \left(\frac{d^2\nu}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{d\nu}{dx}\right) \quad [a].$$

Cette équation est satisfaite en posant

$$\nu = \frac{e^{-\frac{C}{c} n^2 t}}{x} (A \cos nx + B \sin nx) \quad [b].$$

et comme, pour $x = R'$, on doit avoir $\nu = 0$, quel que soit t , il faut qu'on ait $A = 0$ et $nR' = \pi$; alors l'équation précédente devient

$$\nu = \frac{e^{-\frac{C}{c} \frac{\pi^2}{R'^2} t}}{x} \cdot B \sin \frac{\pi x}{R'} \quad [c].$$

Si nous supposons qu'à l'origine du temps, c'est-à-dire pour $t = 0$, cette relation représente les valeurs de ν dans les différentes couches de l'enveloppe, pour $t = 0$ et $x = R$, nous aurons

$$V' = \frac{B}{R} \sin \pi \cdot \frac{R}{R'}; \quad \text{d'où,} \quad B = \frac{V'R}{\sin \pi \frac{R}{R'}};$$

alors l'équation [c] devient

$$\nu = \frac{e^{-\frac{C}{c} \frac{\pi^2}{R'^2} t}}{x} \cdot \frac{V'R}{\sin \pi \frac{R}{R'}} \cdot \sin \pi \frac{x}{R'} \quad [d].$$

Cette valeur de ν n'est exacte qu'autant, comme nous l'avons supposé, qu'elle représente les températures des différents points de l'enveloppe à l'origine du temps; dans ce cas, il est important de remarquer que la vitesse du refroidissement de chaque tranche,

et par conséquent celle de la plus petite et celle de l'eau, sont proportionnelles aux excès de températures, car la valeur de $d\nu:dt$ est proportionnelle à ν .

Si, à l'origine, les températures des différentes enveloppes élémentaires suivaient une toute autre loi que celle qui est indiquée par l'équation [d], la recherche de l'intégrale générale présenterait de très-grandes difficultés analytiques, et ne conduirait d'ailleurs à rien d'utile, puisque l'on ne connaît pas l'état initial de ces températures. Mais il résulte des calculs de Fourier, dans une question qui a la plus grande analogie avec celle qui nous occupe, le refroidissement d'un corps sphérique dans l'air, que l'intégrale générale se compose du terme que nous avons admis et d'une infinité d'autres qui forment une série très-convergente, et que les températures des différentes enveloppes élémentaires tendent toujours davantage à se rapprocher de celles qui correspondent à la relation qui est indiquée par le premier terme.

Reprenons maintenant l'équation [d], et cherchons à remplacer la variable t par la température V de la petite enveloppe élémentaire qui a pour rayon R , température qui est évidemment celle de l'eau qu'elle contient, et qui varie avec t . Pour $x=R$, l'équation [d] donne

$$V=V'.e^{-\frac{C}{c}\frac{\pi^2}{R^2}t}; \quad \text{d'où,} \quad \log V=\log V'-\frac{C}{c}\frac{\pi^2}{R^2}t.\log e; \quad \text{et,} \quad t=\log\left(\frac{V'}{V}\right)\frac{cR^2}{C\pi^2\log e};$$

alors l'équation [d] devient

$$\nu = \frac{e^{-\log\left(\frac{V'}{V}\right)\frac{1}{\log e}}}{x} \cdot \frac{V'R}{\sin \pi \frac{R}{R'}} \cdot \sin \pi \frac{x}{R'} \dots$$

Remarquons maintenant que, pendant un temps très-petit, on peut considérer les températures des enveloppes élémentaires comme constantes; alors la quantité de chaleur qui traversera une couche sera proportionnelle à sa surface, à sa conductibilité et à $d\nu:dx$. Cette quantité de chaleur sera donc $-4\pi x^2 C \frac{d\nu}{dx}$, et, d'après l'équation précédente, elle sera représentée par

$$-4\pi V'RCe^{-\log\left(\frac{V'}{V}\right)\frac{1}{\log e}} \cdot \left\{ \frac{\frac{\pi x}{R'} \cdot \cos \frac{\pi x}{R'} - \sin \frac{\pi x}{R'}}{\sin \frac{\pi R}{R'}} \right\}.$$

Pour obtenir la quantité de chaleur qui traverse la première couche, il faudra faire $x=R$; mais cette quantité de chaleur est exactement celle qui sort de l'eau; nous la représenterons par $P\alpha V$; P étant le poids de l'eau et α la vitesse du refroidissement divisée par V ; on trouve alors

$$P\alpha V = -4\pi V'RCe^{-\log\left(\frac{V'}{V}\right)\frac{1}{\log e}} \cdot \left\{ \pi \frac{R}{R'} \cdot \frac{1}{\tan \frac{\pi R}{R'}} - 1 \right\}; \quad \text{ou,} \quad P\alpha V = 4\pi V'RCe^{-\log\left(\frac{V'}{V}\right)\frac{1}{\log e}} \cdot A;$$

A représentant le facteur constant renfermé dans la parenthèse affecté du signe —. En prenant les logarithmes des deux membres de la dernière équation, on trouve

$$\log (PaV) = \log (4\pi V'.CRA) - \log \left(\frac{V'}{V}\right); \text{ ou, } \log (PaV) = \log (4\pi V'.CRA);$$

d'où,
$$C = \frac{Pa}{4\pi RA}.$$

Telle est, en définitive, la valeur de C en fonction de tous les éléments de la question. Mais cette solution suppose nécessairement que la vitesse du refroidissement de l'eau a lieu de manière que $dv : dt$ soit proportionnel à V. Cette expression paraît être indépendante de la densité et de la capacité calorifique de la matière; mais l'influence de ces éléments se trouve dans la valeur de a.

Pour les deux enveloppes que j'ai employées, on a, $P=1^m,770$ et $R=0^m,076$; pour la première $R'=0^m,090$; pour la seconde $R'=0,119$. Il est évident que, dans le calcul de la valeur de A, il faut prendre pour $\pi, 180^\circ$ quand il s'agit d'une ligne trigonométrique, et 3,1415 quand il s'agit d'un facteur numérique. J'ai trouvé ainsi

Pour la 1 ^{re} enveloppe.	$C = 1118a$	[A],
Pour la 2 ^e enveloppe.	$C = 3632a$	[B].

Les valeurs de C ont été multipliées par 3600, afin que l'unité de temps soit une heure. Le mètre ayant été pris pour unité de longueur et les poids étant estimés en kilogrammes, il s'ensuit que les valeurs de C représentent les quantités de chaleur qui passeraient, par heure, à travers des plaques ayant 1 mètre carré de surface, 1 mètre d'épaisseur, et dont les deux surfaces seraient maintenues à des températures qui différeraient de 1 degré.

Description de l'appareil. La figure 1 (pl. 8), représente une coupe verticale de l'appareil. ABCD est un cadre en cuivre mobile qui se place dans une cuve en fer plombé, pleine d'eau à la température ordinaire. Sur la barre inférieure BC se trouvent trois roues dentées horizontales, E, F, G (fig. 2); la première E reçoit un mouvement de rotation par la tige verticale HI, fixée par la partie inférieure au centre de la roue et munie à sa partie supérieure de la manivelle K; L est une douille destinée à maintenir la tige. La roue G est percée au centre d'une ouverture circulaire à travers laquelle passe la douille fixe M, dans laquelle s'engage la tige N, soudée à la surface de la sphère extérieure et qui est destinée à la soutenir. La roue G porte un cercle horizontal P, P, (fig. 3) à 8 rayons, garnis chacun d'une plaque de cuivre inclinée à 45° ; à sa circonférence se trouvent 8 tiges verticales Q, Q, reliées entre elles à la partie supérieure par un cercle horizontal; sur chacune de ces tiges on fixe, avec des vis, des portions de cercle R, R', garnies d'un grand nombre de petites plaques de cuivre inclinées dont les côtés, les plus éloignés de RR', sont très-rapprochés de la surface extérieure de l'enveloppe sphérique. La figure 4 représente la partie supérieure du cadre et le mode de fermeture du vase dans lequel il est plongé. SS (fig. 1) est un cylindre de cuivre mastiqué à la partie supérieure de l'enveloppe extérieure; il recouvre 3 douilles qui communiquent avec la sphère intérieure; dans l'une passe la tige du thermomètre, dans une autre la tige de l'agitateur,

et la troisième, ordinairement fermée, peut recevoir un bouchon qui porte les tubes destinés à remplir le vase intérieur lorsque le niveau de l'eau a baissé. La surface extérieure de la petite sphère et la surface intérieure de la grande sont couvertes de noir de fumée. La surface de la sphère extérieure est composée de deux parties qui se réunissent par emboîtement; le joint est rendu étanche avec de la cire. Des thermomètres, qui ne sont point indiqués dans les figures, donnaient la température de l'eau du bain. Pendant toute la durée des expériences, l'eau intérieure était agitée par une disposition semblable à celle qui a été employée dans les expériences sur le refroidissement, et l'eau extérieure au moyen de la manivelle K. La vitesse du refroidissement se mesurait comme dans les expériences sur le refroidissement dans l'air, et on faisait de la même manière la correction relative à l'eau qu'on introduisait dans le vase, avant chaque série d'observations, pour le maintenir plein.

Voici maintenant les résultats obtenus dans plusieurs séries d'expériences.

Sable quartzéux passé au tamis de crin. Petite enveloppe. Volume du sable, 1^d,22. Poids du sable, 1^k,720. Densité, 1,41.

Excès de températures.	Valeurs de a .	Valeurs de a corrigées.
43,93	0,000252	0,000246
30,62	0,000249	0,000247
18,62	0,000249	0,000248
11,73	0,000246	0,000246
7,49	0,000246	0,000246

Dans ces expériences, la température de l'eau du bain n'a varié que de 8^o,30 à 9^o,13.

L'égalité presque parfaite des valeurs de a , ramenées à ce qu'elles auraient été si le poids de l'eau eût toujours été de 1^k,770, est un fait important, car il constate que la régularité du refroidissement s'est établie rapidement.

L'expérience, répétée sur le même sable avec la seconde enveloppe, avait d'abord donné des résultats variables; car, pour des excès de température 34,21; 25,89; 16,87; les valeurs de a ont été 0,000747; 0,000730; 0,000725; mais, dans deux autres séries d'expériences, les valeurs de a ont été sensiblement constantes; dans la dernière, pour les excès 33,06; 31,90; 26,67, les valeurs de a ont été 0,000745; 0,000739; 0,000741. Le poids du sable était de 7^k,486, son volume de 5^d,22, et par conséquent sa densité de 1,43.

En admettant le nombre 0,000246 pour la première enveloppe, la formule [A] donne $C=0,275$; le chiffre 0,000074 pour la seconde donne, par la formule [B], $C=0,268$. Ces valeurs de C diffèrent aussi peu qu'on pouvait l'espérer.

Poudre de bois d'acajou desséchée à 50^o. Petite enveloppe.

1^{re} série. Densité, 0,31.

Excès de températures,	62,37	50,30	44,25	19,26
Valeurs de a corrigées,	0,000058	0,000056	0,000059	0,000054

2^e série. Densité, 0,33.

Excès de températures,	46,08	37,39	28,77
Valeurs de a corrigées,	0,0000595	0,0000592	0,0000594

3^e série. Densité, 0,30.

Excès de températures,	55,02	46,32	20,64
Valeurs de a corrigées,	0,0000552	0,0000555	0,0000514

En prenant pour les valeurs de a , les nombres 0,000058; 0,000059; 0,000055; la formule [A] donne pour C, les nombres, 0,0648; 0,0659; 0,0614. Il est important de remarquer que ces nombres s'éloignent peu d'être exactement proportionnels aux densités, car leurs quotients par les densités sont, 0,208; 0,200; 0,204.

Je n'ai fait avec la grande enveloppe qu'une seule série d'expériences; le poids de la poudre était de 1^k,440, le volume 5^d,22, et par conséquent la densité était de 0,276.

Excès de températures,	49,8	44,6	39,4	29,5	27,8
Valeurs de a corrigées,	0,0000293	0,00002703	0,0000242	0,0000238	0,0000236

Ici les valeurs de a décroissent constamment avec l'excès de température, probablement à cause de la faible conductibilité de l'enveloppe, résultant et de celle de la matière et de sa grande épaisseur. En supposant que les valeurs de a soient représentées par la formule $a = m + nt$, et, déterminant les valeurs de m et de n par la première et dernière expression, on trouve

$$a = 0,0000164 + 0,00000026t.$$

Cette formule donne pour les valeurs intermédiaires des nombres qui se rapprochent beaucoup de ceux qui résultent de l'expérience; car les valeurs de a correspondantes aux cinq excès de températures sont 0,0000293; 0,0000279; 0,0000266; 0,0000240; 0,0000236. Mais, dans cette expression, la valeur de a s'approche constamment de 0,0000164 à mesure que l'excès de température diminue; en prenant cette valeur, l'équation [B] donne $C = 0,059$. En admettant, ce qui semble résulter des expériences faites sur la petite enveloppe, que la conductibilité de la matière dont il s'agit soit proportionnelle à sa densité, la valeur de C aurait dû être de 0,057. La différence provient probablement de ce que les valeurs de a suivent une autre loi que celle que nous avons supposée, et qu'elles se rapprochent d'une quantité plus petite que 0,0000164; en prenant 0,000016 pour la limite des valeurs de a , on trouve pour la valeur de C, 0,058.

Coton en laine. J'ai fait un grand nombre d'expériences sur le coton en laine cardé, plus ou moins comprimé, et par conséquent sous différentes densités. Sans exceptions, j'ai toujours obtenu pour a des valeurs qui allaient en diminuant d'une manière notable avec l'excès de température, et ce qu'il y a de remarquable, la loi de ces décroissements n'a pas changé d'une manière sensible. Je n'ai opéré qu'avec la petite enveloppe.

1^{re} Série. Densité, 0,0077.

Excès de températures,	61,5	42,8	23,3.
Valeurs de a corrigées,	0,0000458	0,0000430	0,0000400.

Ces nombres sont sensiblement représentés par la formule, $a = 0,0000366 (1 + 0,0041 t)$.

2^{me} Série. Densité, 0,0166.

Excès de température,	59,8	52,6	23,6	21,7.
Valeurs de a corrigées,	0,0000411	0,0000406	0,0000369	0,0000361.

Ces nombres sont sensiblement représentés par la formule $a=0,0000332(1+0,0041t)$.

3^{me} Série. Densité, 0,0332.

Excès de température,	59,3	52,4	31,7	27,4.
Valeurs de a corrigées,	0,0000395	0,0000393	0,0000363	0,0000359.

Ces nombres satisfont à très-peu près à l'équation $a=0,0000321(1+0,0041t)$.

4^{me} Série. Densité, 0,0576.

Excès de température,	51,9	34,6.
Valeurs de a corrigées,	0,0000363	0,0000347.

Ces nombres satisfont à la formule $a=0,0000300(1+0,0041t)$.

5^{me} Série. Densité, 0,0768.

Excès de température,	58,4	51,6	31,0	29,2.
Valeurs de a corrigées,	0,0000410	0,0000400	0,0000384	0,0000382.

Ces nombres sont sensiblement représentés par la formule, $a=0,0000328(1+0,0041t)$.

Pour calculer la conductibilité du coton dans ces différents états, il faut prendre pour a le coefficient de sa valeur générale; on trouve alors par la formule [A] les résultats suivants :

$$d = 0,0077 \dots \dots \dots c = 0,0409.$$

$$d = 0,0166 \dots \dots \dots c = 0,0371.$$

$$d = 0,0332 \dots \dots \dots c = 0,0359.$$

$$d = 0,0576 \dots \dots \dots c = 0,0335.$$

$$d = 0,0768 \dots \dots \dots c = 0,0366.$$

Ainsi, pour des densités qui ont augmenté progressivement de 1 à 10, les conductibilités ont varié irrégulièrement et dans les limites des nombres 41 et 33. Ces différences peuvent être attribuées à de petits espaces libres dans lesquels l'air a pu se déplacer pendant le refroidissement. Cette explication est d'autant plus vraisemblable que l'édredon, matière beaucoup plus élastique, n'a jamais présenté de semblables anomalies, comme nous le verrons plus tard. Ainsi la conductibilité du coton en laine est indépendante de sa densité, ce qui ne peut s'expliquer qu'en admettant que la conductibilité de la matière textile soit égale à celle de l'air stagnant. Sa valeur moyenne serait à peu près de 0,037.

Charbon en poudre. Les expériences faites sur le charbon en poudre ont donné des résultats peu satisfaisants. Non-seulement les valeurs de a ont diminué avec l'excès de température; mais la loi de décroissement n'était pas la même dans toutes les séries, comme cela a eu lieu pour le coton. Je pense que ces variations proviennent de l'absence complète d'élasticité dans le charbon en poudre, d'où il résultait que par le refroidissement, la couche de charbon se séparait de la sphère enveloppante à la partie supérieure. Quoi qu'il en soit, je rapporterai les résultats obtenus en donnant seulement les valeurs générales de a et les valeurs de C correspondantes; dans le plus grand nombre des séries, les excès de température ont varié de 51 à 20 degrés.

1 ^{re} série. Charbon ordinaire en poudre. $d = 0,32$.		
	$a = 0,0000565 (1 + 0,0075t)$	C = 0,063
2 ^e série. Charbon ordinaire passé au tamis de crin. $d = 0,37$.		
	$a = 0,0000603 (1 + 0,0077t)$	C = 0,067
3 ^e série. Charbon ordinaire passé au tamis de crin, desséché à 100°. $d = 0,36$.		
	$a = 0,0000669 (1 + 0,0037t)$	C = 0,074
4 ^e série. Le même, mais comprimé. $d = 0,37$.		
	$a = 0,0000670 (1 + 0,0033t)$	C = 0,074
5 ^e série. Le même, passé au tamis de soie. $d = 0,36$,		
	$a = 0,0000734 (1 + 0,0038t)$	C = 0,082
6 ^e série. Charbon ordinaire passé au tamis de crin, calciné au rouge blanc. $d = 0,29$.		
	$a = 0,0000640 (1 + 0,0034t)$	C = 0,071
7 ^e série. Le même, passé au tamis de soie. $d = 0,35$.		
	$a = 0,000082$	C = 0,091

Malgré les anomalies que présentent ces expériences, on voit qu'il y a bien peu de différence entre les charbons de bois ordinaires et ceux qui ont été soumis au rouge blanc, lorsqu'ils sont en poudres. Mais on ne peut rien en conclure relativement à ces charbons en morceaux, parce qu'il y a une très-grande différence entre les facultés conductrices d'un même corps en masse et en poudre, et que cette différence varie avec la nature du corps. Ainsi le fer en limaille et le coke en poudre ont à peu près la même faculté conductrice, et celles du fer en barre et du coke en morceaux ont une différence énorme.

Colle d'amidon. Je n'ai employé que la petite enveloppe. La densité de cette colle était 1,017; 50 grammes de colle desséchée se sont réduits à 6^s,5; ainsi la colle était composée de 87 parties d'eau et de 13 de fécule.

Excès de température,	27,46	24,05	15,48	5,30
Valeurs de a corrigées,	0,600383	0,000389	0,000378	0,000354

En admettant le nombre 0,00038 qui résulte des trois premières expériences, la formule [A] donne $c = 0,425$. Il est probable que ce nombre doit peu s'éloigner de la conductibilité de l'eau stagnante.

Ce mode d'expérience présentant de l'incertitude pour les corps très-mauvais conducteurs qui donnent toujours pour a une valeur décroissante avec l'excès de température, et la construction de sphères creuses avec les matériaux qu'on emploie généralement dans les constructions présentant beaucoup de difficultés, j'ai dû chercher d'autres méthodes exemptes de ces incertitudes et de ces difficultés.

DEUXIÈME MÉTHODE.

Imaginons deux cylindres concentriques de même hauteur, isolés par les deux bouts, placés dans une enceinte à température constante, le cylindre intérieur chauffé par de la

vapeur d'eau, l'intervalle des deux cylindres occupé par la matière dont on veut mesurer la conductibilité, et supposons que nous ayons le moyen de mesurer à chaque instant la température de la surface extérieure. Il est évident que cette température ira d'abord en croissant, qu'après un certain temps elle restera stationnaire, et qu'à partir de cet instant, la quantité de chaleur qui traversera l'enveloppe sera égale à celle qui se disperse par la surface.

Cela posé, en désignant par r le rayon d'une enveloppe élémentaire, par h sa hauteur, par t sa température, par t' , t'' , t''' les températures de la vapeur, de la surface extérieure de l'enveloppe cylindrique et de l'air, par R, R' les rayons des deux cylindres, et enfin par $Q (t'' - t''')$ la quantité de chaleur perdue par heure et par mètre carré par la surface extérieure du cylindre, nous aurons, quand la permanence de température sera établie,

$$-\frac{2\pi rh C dt}{dr} = 2\pi R' h Q (t'' - t'''); \text{ ou, } C dt = -R' Q (t'' - t''') \frac{dr}{r};$$

$$\text{et, } C (t' - t''') = QR' (t'' - t''') n (\log R' - \log R); \text{ d'où, } C = \frac{QR' n (t'' - t''') (\log R' - \log R)}{t' - t'''} \quad [C].$$

n étant le module des tables de logarithmes, qui, comme on sait, est égal à 2,3025, et Q étant égal à $(K + K') (1 + 0,0065 (t'' - t'''))$ (page 101).

Tout ce que nous venons de dire suppose nécessairement qu'un cylindre creux formé d'un corps mauvais conducteur se comporte, dans le refroidissement, comme un cylindre de mêmes dimensions plein d'eau constamment agitée; mais il n'en est pas exact(e) ainsi. En effet, quand un vase cylindrique vertical plein d'eau chaude se refroidit, il est en contact avec une enveloppe d'air, dont la température augmente de bas en haut; résulte de là, que si une enveloppe cylindrique formée d'un corps mauvais conducteur, était maintenue intérieurement à une température constante, sa surface extérieure étant exposée à l'air, et si on supposait que la transmission de la chaleur n'eût lieu que dans le sens des rayons et que le refroidissement ne s'effectuât que par le contact de l'air, quand le régime serait établi, la surface extérieure aurait une température croissante de bas en haut. Ces variations sont fort atténuées par la conductibilité de la matière dans tous les sens et par le rayonnement quand la surface du cylindre est terne; mais elles subsistent comme je m'en suis assuré. Elles sont beaucoup plus marquées dans une enveloppe sphérique épaisse remplie de coton; car on peut constater, par le seul contact des mains, une différence de température très-sensible, aux extrémités du diamètre vertical. Il résulte de là, que pour déterminer la conductibilité par la méthode que nous venons d'indiquer, il faudrait connaître la hauteur à laquelle on devrait mesurer la température de la surface du cylindre, pour que la quantité de chaleur qu'il perd fût égale à celle qu'il perdrait si toute sa surface avait cette température. Pour éviter cette difficulté j'ai toujours employé des cylindres de 0^m,20 de hauteur, j'ai mesuré la température de la surface au milieu de la hauteur, et j'ai déterminé la valeur de Q de manière à obtenir pour le sable quartzeux le même nombre que celui qui a été obtenu par le refroidissement dans l'eau, méthode qui ne présente aucune incertitude. Pour satisfaire à cette condition, la valeur

de Q déduite des formules relatives au refroidissement, doit être multipliée par 1,08. La valeur de Q ainsi modifiée, donne pour la poussière de bois d'acajou les mêmes chiffres que ceux qui ont été obtenus par la première méthode, quoique la conductibilité de cette matière soit beaucoup plus petite que celle du sable; il est par conséquent très-probable que la correction dont nous venons de parler convient également pour les autres substances.

J'avais pensé à envelopper les corps solides d'une lame métallique et à placer les corps en poudre ou fibreux dans des cylindres de tôle, dans l'espoir que le métal répartirait également la température à la surface; mais l'uniformité de température ne s'établit pas, la température du milieu est trop petite et conduit à une valeur trop faible de la conductibilité.

Voici maintenant la description de l'appareil employé et du moyen dont je me suis servi pour mesurer la température de la surface des cylindres.

Pour les matières pulvérulentes, l'appareil se composait (fig. 5, pl. 8), d'un vase de fer-blanc $abcd$, cylindrique, vertical, de 0^m,20 de hauteur, d'un diamètre variable et couvert de papier; il était surmonté d'un tube ef fermé en dessus par un bouchon à travers lequel passait la tige d'un thermomètre, dont le 100^e degré dépassait de fort peu la surface supérieure du bouchon; ce tube était garni latéralement d'un tuyau fg communiquant avec un vase produisant de la vapeur; à sa partie inférieure, le vase était soudé à un tuyau hik , coudé en i , destiné à faire écouler l'eau provenant de la vapeur condensée et la vapeur en excès. A deux centimètres au-dessous du cylindre $abcd$, le tube hi était garni de trois petites tiges horizontales en fer, de 0^m,02 de longueur, destinées à soutenir un plateau de bois lm , qu'on introduisait en enlevant le tube horizontal ik , et en faisant passer les tiges du tube à travers des fentes correspondantes pratiquées dans le plateau: par un petit mouvement de rotation le plateau se trouvait soutenu (fig. 6 et 7). Avant son introduction, on avait fixé sur la partie supérieure du plateau un cylindre de verre $npqr$ très-mince, ouvert par les deux bouts, de même diamètre que le plateau, et maintenu au moyen d'une bande de papier collée à la fois sur le verre et sur le bois. Le cylindre de verre était recouvert de papier blanc sur toute sa surface, et la feuille de papier dépassait ses deux extrémités, à peu près de 0^m,10. La matière qui devait être soumise à l'expérience était placée entre les deux cylindres $abcd$ et $npqr$, et on remplissait de coton cardé les cylindres de papier qui formaient les deux prolongements du cylindre de verre. L'appareil que nous venons de décrire, était suspendu dans la chambre à température constante, qui a été employée pour les expériences sur le refroidissement, au moyen des tiges st qui s'appuyaient sur les bords de l'orifice de la chambre. On faisait passer de la vapeur dans le cylindre de fer-blanc pendant deux ou trois heures.

La température de la surface extérieure du cylindre a été obtenue de la manière suivante. Un ruban de fer très-mince, de 1 centimètre de largeur, de 2 mètres de longueur, était soudé, à ses deux extrémités, à deux rubans de cuivre rouge de mêmes dimensions, l'une des soudures et les parties adjacentes des rubans étaient appliquées contre le cylindre de verre, l'autre sur la surface d'un vase cylindrique M , renfermant de l'eau dont on pouvait facilement faire varier la température, et qui contenait un agitateur et un thermomètre; enfin les deux extrémités libres des rubans de cuivre pouvaient être mises en communication avec un rhéomètre très-sensible N . Lorsqu'on voulait mesurer la tempé-

rature de la surface du cylindre, on fermait le circuit et on éleait la température de l'eau du vase, jusqu'à ce que l'aiguille du rhéomètre revînt au zéro; à cet instant les deux soudures étaient à la même température et par conséquent celle de la surface du cylindre était égale à celle de l'eau du vase. Pour fixer les soudures à la surface des deux cylindres on employait une tresse de coton de 0^m,02 de largeur qui enveloppait le ruban métallique et le pressait sur une très-grande partie de la circonférence du cylindre, le ruban était maintenu serré par une boucle, et les extrémités libres du ruban sortaient par des fentes pratiquées dans la tresse. Le thermomètre destiné à indiquer la température de l'eau renfermée dans le vase, dont la surface était en contact avec la seconde soudure du circuit, était placé horizontalement afin de rendre la lecture plus facile, sa tige était protégée par une planche verticale placée un peu au-dessous; on pouvait facilement estimer deux centièmes de degré; le vase était chauffé par une lampe à alcool. Le rhéomètre construit par M. Rumcoff était assez sensible pour indiquer un vingtième de degré entre les deux soudures.

La figure 5 représente l'ensemble de l'appareil. Les détails que nous venons de donner permettent d'en comprendre facilement toutes les parties. La figure 5 *bis* représente la projection horizontale du vase environné par l'une des soudures et du thermomètre destiné à faire connaître la température de l'eau qu'il contient.

On pourrait craindre que dans ce mode d'expérience, le cylindre de verre eût une influence sensible sur les résultats; mais comme son épaisseur, à peu près de 0^m,0005, était très-petite par rapport à celle de la matière qu'il enveloppait et que la conductibilité du verre est très-grande relativement à celle des matières textiles et des poudres en général, cette influence était négligeable; c'est ce qu'il est d'ailleurs facile de reconnaître.

Considérons trois cylindres concentriques, de même hauteur h , dont nous représenterons les rayons par R, R', R'' ; le premier chauffé par la vapeur, l'intervalle du premier et du second rempli par une matière dont la conductibilité est C , l'intervalle du second et du troisième occupé par une matière ayant une conductibilité représentée par C' ; et supposons que le dernier soit exposé à l'air. En désignant par M la quantité de chaleur émise par heure par la surface extérieure, nous aurons, quand le régime sera établi

$$M = -\frac{2\pi r h C d\theta}{dr}; \quad \text{ou,} \quad C d\theta = -\frac{M}{2\pi h} \cdot \frac{dr}{r}; \quad \text{et, par suite,}$$

pour la première enveloppe,

$$C(t - t') = \frac{M}{2\pi h} n(\log R' - \log R);$$

pour la seconde enveloppe,

$$C'(t' - t'') = \frac{M}{2\pi h} \cdot n(\log R'' - \log R').$$

et comme $M = 2\pi R'' Q h(t'' - t''')$, ces deux équations deviennent

$$C(t - t') = QR''(t'' - t''')n(\log R' - \log R); \quad \text{et} \quad C'(t' - t'') = QR''(t'' - t''')n(\log R'' - \log R').$$

En éliminant t' entre ces deux équations on trouve

$$C = \frac{C'QR''(t'' - t''')n(\log R' - \log R)}{C'(t - t'') - QR''(t'' - t''')n(\log R'' - \log R')}. \quad [D]$$

Quand le second terme du dénominateur est très-petit par rapport au premier, on peut le supprimer, C' disparaît alors et on retombe sur la valeur de C que nous avons trouvée précédemment. Or, le cylindre de verre que j'ai employé avait $0^m,0690$ de rayon extérieur, $0^m,0685$ de rayon intérieur, le cylindre de fer-blanc $0^m,04$; en résolvant l'équation (D) par rapport à t'' , et prenant $Q = 8$, $t = 100^0$, $t''' = 12$, $C' = 0,8$, et successivement, pour le sable $C = 0,27$, pour le coton $C = 0,036$; on trouve dans le premier cas $t'' = 53,95$, dans le second $t'' = 21,57$; avec ces nombres on trouve que les deux termes du dénominateur de l'équation (D) sont : pour le sable $36,84$ et $0,16$, et pour le coton $62,74$ et $0,038$; ainsi, pour ces deux corps, qui occupent les limites extrêmes des conductibilités observées, on voit que l'influence de l'enveloppe de verre est complètement négligeable.

J'ai aussi employé une enveloppe de papier collée sur trois cylindres de fer-blanc, de même axe et de même rayon, de $0^m,01$ de hauteur, maintenus par deux tiges étroites de fer-blanc (fig. 8); la bande de fer-blanc du milieu permettait de serrer le ruban métallique destiné à mesurer la température de la surface du cylindre. Cette méthode a donné sensiblement les mêmes résultats que le cylindre de verre, ce qui confirme ce que nous venons de dire relativement à la faible influence de cette enveloppe.

Pour les corps solides tels que la pierre, le marbre, j'ai employé des cylindres creux, peints à l'huile intérieurement et couverts de papier sur la surface extérieure; le plus souvent, pour être mieux assuré que l'eau ne pût pas pénétrer la matière, la surface intérieure était couverte d'une feuille d'étain fixée avec de la colle de fécule. Les cylindres étaient fermés à chaque extrémité par une lame de caoutchouc, puis par un disque de bois; pour ces cylindres, comme pour ceux de fer-blanc, la vapeur arrivait par la partie supérieure et s'écoulait par le bas. Ils étaient soutenus par la partie inférieure, et isolés par les deux bouts au moyen de cylindres de papier remplis de coton (fig. 9). Pour les bois, j'ai employé la même disposition, lorsqu'il s'agissait d'observer leur conductibilité perpendiculairement aux fibres; mais pour l'observer parallèlement, j'ai employé des portions de cylindres dont les surfaces étaient perpendiculaires aux fibres, elles étaient fortement comprimées contre le cylindre de fer-blanc couvert de papier, qui avait pour rayon celui du cylindre intérieur des enveloppes de bois.

Quant aux papiers et aux étoffes, on les enroulait contre un cylindre de fer-blanc, toujours couvert de papier, et on les maintenait par une bande de papier fort, ayant une hauteur double de celle du cylindre, qui était maintenue elle-même par le ruban métallique et la tresse qui l'enveloppait (fig. 10).

Dans toutes ces expériences, une condition importante à remplir consiste à mettre la portion du ruban métallique qui environne le cylindre en contact avec sa surface dans la plus grande partie de la circonférence, à cause de la chaleur transmise par les parties libres du ruban qui abaisse la température de la soudure, d'autant plus que la longueur du ruban appliquée contre le cylindre est plus petite. Cette circonstance a une si grande influence qu'on ne pourrait pas compter sur les résultats obtenus avec des cylindres d'un petit diamètre.

Malgré toutes ces précautions, toutes les fois que la température de la surface du cylindre extérieure s'approchait de 90^0 , ce qui arrivait quand la matière de l'enveloppe cy-

lindrique conduisait bien la chaleur ou quand cette enveloppe n'avait qu'une faible épaisseur, je n'ai jamais obtenu des résultats bien concordants. Ainsi, toutes les expériences faites avec des cylindres de marbre et de pierre de liais, de 0^m,10 de diamètre intérieur et de 0^m,14 de diamètre extérieur, ont donné des résultats variables, et toujours trop petits, comme je m'en suis assuré depuis, et j'ai été obligé d'employer des enveloppes d'une plus grande épaisseur.

Il nous reste maintenant à dire comment la valeur de Q a été déterminée. Nous avons vu que pour un corps à surface terne dont la température était t' , placé dans une enceinte à la température t'' , et pour des excès de $t' - t''$, compris entre 25 et 65 degrés, la quantité M de chaleur perdue par mètre carré et par heure était donnée par l'équation

$$M = (K + K')(t' - t'')[1 + 0,0065(t' - t'')].$$

D'après cette équation, $Q = (K + K')[1 + 0,0065(t' - t'')]$; or, pour le papier, $K = 3,73$; et les valeurs de K' pour des cylindres de 0^m,20 de hauteur, et de différents diamètres sont données par la formule [8] (page 100). On trouve alors que pour les rayons

0^m,03; 0^m,04; 0^m,05; 0^m,06; 0^m,07; 0^m,08; 0^m,09; 0^m,10; 0^m,11; 0^m,12;

les valeurs de $K + K'$, sont

7,78; 7,66; 7,59; 7,53; 7,50; 7,46; 7,41; 7,37; 7,36; 7,35.

Mais, comme nous l'avons déjà dit, pour que les nouvelles expériences s'accordent avec celles qui ont été faites par l'observation du refroidissement dans l'eau, il faut que les valeurs de $K + K'$, ou celles de Q, soient multipliées par 1,08.

Les expériences sur un même corps ont toujours été répétées plusieurs fois; et toujours le chauffage par la vapeur a été maintenu deux ou trois heures, afin qu'on fût bien certain que le régime était établi; on s'assurait d'ailleurs par des expériences réitérées que la température de la surface du cylindre était constante. Au commencement de ces recherches, j'obtenais souvent de singulières anomalies qui provenaient de ce que certaines précautions dont j'ai parlé n'avaient pas été prises; je me contenterai de rapporter les résultats des expériences les plus récentes, de celles qui ont été faites dans des conditions qui ne présentent que les causes d'erreur inévitables dans des expériences de cette nature.

Sable quartzeux.....	$d = 1,46$	$R' = 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,275$
»	$d = 1,46$	$R' = 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,270$
»	$d = 1,47$	$R' = 0,0405$	$R = 0,0255$	$C = 0,263$
»	$d = 1,47$	$R' = 0,0405$	$R = 0,0255$	$C = 0,277$
»	$d = 1,47$	$R' = 0,0405$	$R = 0,0255$	$C = 0,260$
»	$d = 1,47$	$R' = 0,0405$	$R = 0,0255$	$C = 0,277$
Poudre de bois d'acajou.....	$d = 0,30$	$R' = 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,067$
»	$d = 0,32$	$R' = 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,068$
»	$d = 0,32$	$R' = 0,0405$	$R = 0,0255$	$C = 0,067$
» passée au tamis de soie.	$d = 0,37$	$R' = 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,072$
Coton en laine.....	$d = 0,031$	$R' = 0,0405$	$R = 0,0255$	$C = 0,0395$
»	$d = 0,031$	$R' = 0,0405$	$R = 0,0255$	$C = 0,0398$

Coton en laine.....	$d \approx 0,042$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,0410$
»	$d \approx 0,058$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,041$
Molleton de coton.....	$d \approx 0,26$	$R' \approx 0,031$	$R = 0,0255$	$C = 0,0375$
»	$d \approx 0,26$	$R' \approx 0,0310$	$R = 0,0255$	$C = 0,0380$
»	$d \approx 0,26$	$R' \approx 0,0310$	$R = 0,0255$	$C = 0,0369$
»	$d \approx 0,210$	$R' \approx 0,048$	$R = 0,0255$	$C = 0,0407$
»	$d \approx 0,21$	$R' \approx 0,048$	$R = 0,0255$	$C = 0,0401$
Calicot neuf.....	$d \approx 0,66$	$R' \approx 0,445$	$R = 0,040$	$C = 0,0500$
»	$d \approx 0,66$	$R' \approx 0,45$	$R = 0,040$	$C = 0,0505$
»	$d \approx 0,66$	$R' \approx 0,45$	$R = 0,040$	$C = 0,0518$
Laine cardée.....	$d \approx 0,028$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,0405$	$C = 0,047$
»	$d \approx 0,055$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,0405$	$C = 0,043$
»	$d \approx 0,068$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,0405$	$C = 0,045$
»	$d \approx 0,082$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,0405$	$C = 0,042$
Molleton de laine.....	$d \approx 0,21$	$R' \approx 0,0305$	$R = 0,0255$	$C = 0,025$
»	$d \approx 0,20$	$R' \approx 0,047$	$R = 0,0405$	$C = 0,027$
»	$d \approx 0,193$	$R' \approx 0,0475$	$R = 0,0405$	$C = 0,024$
»	$d \approx 0,24$	$R' \approx 0,0475$	$R = 0,0405$	$C = 0,024$
»	$d \approx 0,19$	$R' \approx 0,0490$	$R = 0,0405$	$C = 0,022$
Édredon.....	$d \approx 0,015$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,0405$	$C = 0,0386$
»	$d \approx 0,030$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,0405$	$C = 0,0388$
»	$d \approx 0,030$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,0405$	$C = 0,0396$
»	$d \approx 0,061$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,0405$	$C = 0,0388$
Toile de chanvre neuve.....	$d \approx 0,54$	$R' \approx 0,0475$	$R = 0,0405$	$C = 0,052$
»	$d \approx 0,54$	$R' \approx 0,0475$	$R = 0,0405$	$C = 0,052$
Toile de chanvre vieille.....	$d \approx 0,58$	$R' \approx 0,0450$	$R = 0,0405$	$C = 0,043$
Papier à écrire.....	$d \approx 0,85$	$R' \approx 0,0450$	$R = 0,0405$	$C = 0,0437$
»	$d \approx 0,85$	$R' \approx 0,0450$	$R = 0,0405$	$C = 0,0435$
Papier gris non collé.....	$d \approx 0,48$	$R' \approx 0,045$	$R = 0,0405$	$C = 0,033$
»	$d \approx 0,48$	$R' \approx 0,051$	$R = 0,0405$	$C = 0,035$
Brique pulvér. passée au tamis de soie.	$d \approx 1,16$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,165$
»	$d \approx 1,16$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,161$
» (gros grains égaux ¹). . . .	$d \approx 1,00$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,139$
»	$d \approx 1,00$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,135$
» (poudre très-fine obtenue par décantation)	$d \approx 1,55$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,140$
»	$d \approx 1,55$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,137$
»	$d \approx 1,55$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,146$
Fécule de pomme de terre	$d \approx 0,71$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,098$
Craie en poudre	$d \approx 0,92$	$R' \approx 0,0405$	$R = 0,0255$	$C = 0,108$
Craie en poudre lavée et séchée. . . .	$d \approx 0,85$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,086$
»	$d \approx 1,02$	$R' \approx 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,103$
Cendre de bois.	$d \approx 0,45$	$R' \approx 0,0405$	$R = 0,0255$	$C = 0,065$

1. Ces grains ont été obtenus en enlevant les grains fins par le tamis de scie, et les grains trop gros par un tamis métallique.

Cendre de bois.....	$d = 0,45$	$R' = 0,0405$	$R = 0,0255$	$C = 0,068$
Charbon de bois en poudre.....	$d = 0,49$	$R' = 0,04075$	$R = 0,0255$	$C = 0,079$
Braise de boulanger, passée au tamis de soie.....	$d = 0,25$	$R' = 0,069$	$R = 0,040$	$C = 0,068$
" "	" "	" "	" "	$C = 0,068$
Charbon ordinaire, passé au tamis de soie.....	$d = 0,41$	$R' = 0,069$	$R = 0,04$	$C = 0,081$
" "	" "	" "	" "	$C = 0,082$
Coke pulvérisé.....	$d = 0,77$	$R' = 0,069$	$R = 0,04$	$C = 0,160$
" "	" "	" "	" "	$C = 0,156$
Limaille de fer.....	$d = 2,05$	$R' = 0,040$	$R = 0,0255$	$C = 0,157$
" "	" "	" "	" "	$C = 0,159$
Bioxyde de manganèse en poudre. . .	$d = 1,46$	$R' = 0,069$	$R = 0,04$	$C = 0,163$
Plâtre ordinaire gâché.....	$d = "$	$R' = 0,188$	$R = 100$	$C = 0,331$
" "	" "	$R' = 0,231$	$R = 100$	$C = 0,331$
Pierre calcaire à bâtir, à gros grains.	$d = 2,24$	$R' = 0,095$	$R = 0,055$	$C = 1,32$
" "	$d = 2,22$	$R' = 0,1165$	$R = 0,0385$	$C = 1,27$
Bois de sapin, transmission perpendi- culaire aux fibres.....	"	$R' = 0,0465$	$R = 0,0255$	$C = 0,093$
" " parallèlement aux fibres.	"	$R' = 0,0465$	$R = 0,0255$	$C = 0,170$
Bois de noyer, transmission perpendi- culaire aux fibres.....	"	$R' = 0,0465$	$R = 0,0255$	$C = 0,103$
" " "	"	" "	" "	$C = 0,103$
" " parallèlement aux fibres.	"	$R' = 0,0465$	$R = 0,0255$	$C = 0,174$
Bois de chêne, transmission perpen- diculaire aux fibres.....	$d = 0,664$	$R' = 0,0438$	$R = 0,0335$	$C = 0,200$

Comme, pour les matières poreuses telles que les bois et les pierres, on pouvait craindre, malgré une couche de peinture intérieure ou une lame d'étain, que la vapeur ne pénétrât à travers la matière et ne changeât la conductibilité, j'ai fait quelques expériences avec la disposition suivante. On plaçait dans l'intérieur du vase un cylindre de fer-blanc d'un plus petit diamètre, chauffé par la vapeur, et du sable dans l'intervalle.

Dans le cas dont il s'agit, la valeur de la conductibilité de l'enveloppe cylindrique est précisément celle de C' dans l'équation (D), page 162. Cette équation résolue par rapport à C' donne

$$C' = \frac{CQR''(t'' - t''') \cdot n(\log R'' - \log R')}{C(t - t'') - QR''(t'' - t''')n(\log R' - \log R')} \quad [F]$$

équation dans laquelle il faut prendre pour Q les valeurs que nous avons trouvées précédemment. Voici les résultats obtenus dans deux expériences faites sur des cylindres de bois de chêne bien secs.

1^{er} cylindre. $R = 0,0255$; $R' = 0,0335$; $R'' = 0,0435$; $t = 100,3$; $t'' = 57,66$; $t''' = 13,61$;

$$Q = 7,62 \cdot 1,08 = 8,23;$$

pour ces nombres, la formule donne, $C' = 0,167$.

2 cylindre. $R = 0,0255$; $R' = 0,0335$; $R'' = 0,0530$; $t = 99,83$; $t' = 46,96$; $t'' = 14,08$;

$$Q = 7,60.1,08 = 8,208,$$

ces nombres donnent,

$$C' = 0,172.$$

Ces résultats s'accordent assez bien entre eux ; mais ils diffèrent, en moins, de près de un septième de celui qui a été obtenu en chauffant directement un des cylindres de bois par la vapeur.

Au commencement de ces recherches, j'ai fait beaucoup d'expériences sur d'autres cylindres de marbre, de pierre, de verre, de bois, de sable humide, chauffés directement ou indirectement par la vapeur ; quelques-unes s'accordaient avec des expériences plus récentes, d'autres, en plus grand nombre, ont donné des résultats beaucoup plus petits. J'ai pensé que ces erreurs provenaient de ce que le ruban métallique n'avait pas été appliqué sur une assez grande étendue de la surface du cylindre, et que, pour quelques-uns, notamment pour le verre, j'avais employé des cylindres d'un trop petit diamètre. Je devais reprendre ces expériences, qui avaient été faites à une époque où je ne connaissais qu'imparfaitement les conditions à remplir, mais j'ai préféré employer une autre méthode beaucoup plus simple dans laquelle on se sert de plaques au lieu de cylindres.

TROISIÈME MÉTHODE.

Voici d'abord le principe de cette nouvelle disposition. Une plaque rectangulaire verticale, de la matière dont on veut déterminer la conductibilité, est chauffée d'un côté par de la vapeur d'eau, sa surface opposée étant couverte de papier ; un vase, ayant une surface plane verticale égale à celle de la plaque et renfermant de l'eau dont on peut à volonté faire varier la température, est placé de manière que sa surface verticale, qui est aussi couverte de papier blanc, soit parallèle à la surface de la plaque. Entre ces deux surfaces et à égale distance de chacune d'elles, est placée une pile thermo-électrique communiquant avec un rhéomètre très-sensible. On chauffe la plaque en mettant sa face extérieure en contact avec de la vapeur pendant plusieurs heures, et quand on est certain que le régime est établi, on chauffe l'eau du vase jusqu'à ce que, par les actions simultanées des surfaces en regard des extrémités de la pile, l'aiguille du rhéomètre revienne au zéro ; alors la température de la surface libre de la plaque est égale à celle de l'eau du vase. Connaissant ainsi la température de la surface libre de la plaque, il est facile d'en déduire la conductibilité de la matière dont elle est formée.

Désignons par t, t', t'' , les températures de la vapeur, de la surface libre de la plaque, et de l'air, par M la quantité de chaleur perdue par mètre carré et par heure par la surface libre de la plaque, par e son épaisseur, par S sa surface, et par C sa conductibilité. Nous aurons d'abord, en supposant que l'excès de t' sur t'' soit compris entre 25° et 65° , et que t'' diffère peu de 12° ,

$$M = S(K + K'[(t' - t'')(1 + 0,0065(t' - t''))], \text{ ou } M = Q(t' - t'');$$

en désignant, comme précédemment, par Q l'expression $(K + K') [1 + 0,0065 (t' - t'')]$, qui peut être calculée dans chaque cas particulier. Nous aurons ensuite évidemment

$$S \cdot Q(t' - t'') = \frac{SC(t - t')}{e}; \quad \text{d'où l'on tire, } C = \frac{eQ(t' - t'')}{t - t'} \quad [F].$$

Si l'y avait deux plaques superposées, en désignant leurs conductibilités par C et C' , leurs épaisseurs par e et e' , par t_1 , la température des deux surfaces en contact, on aura, quand le régime sera établi,

$$SQ(t' - t'') = \frac{SC(t - t_1)}{e}; \quad SQ(t' - t'') = \frac{SC'(t_1 - t')}{e'};$$

d'où l'on tire

$$C' = \frac{Q(t' - t'')Ce'}{C(t - t') - Qe(t' - t'')} \quad [G].$$

Cette dernière équation servirait à déterminer C' si C était connu.

Description de l'appareil. — La figure 11, planche 8, représente l'appareil vu en dessus; les figures 12 et 13, les élévations des deux longues faces; la figure 14, une coupe verticale perpendiculaire aux deux élévations. Dans toutes ces figures, les mêmes lettres indiquent les mêmes objets. ABCD est une caisse rectangulaire en tôle plombée, fermée de toutes parts et pleine d'eau; elle est environnée d'une caisse en bois XXXX; les fonds et les petites faces des deux caisses sont séparés par un intervalle de 6 centimètres; les grandes faces de la caisse de tôle ne sont qu'en partie couvertes de bois, comme on le voit dans les figures 11, 12 et 13. Les espaces AXXC et BXXD qui séparent deux faces latérales de la caisse de tôle de celles de bois, renferment un grand nombre de plaques de tôle verticales, soudées à la caisse de tôle; elles ont pour objet de donner à l'air qui traverse les canaux AXXC et BXXD la température de l'eau renfermée dans la caisse de tôle. GG et HH sont deux canaux rectangulaires verticaux qui traversent de part en part la caisse de tôle et qui communiquent par le dessous de la caisse avec les canaux AXXC et BXXD. II est un canal vertical pratiqué dans la caisse de tôle, mais qui ne la traverse pas de part en part. K, K (fig. 14) sont deux tubes circulaires horizontaux de même axe et de même diamètre, ouverts par les deux bouts. LLLL sont des ouvertures rectangulaires de 0^m,20 de côté, percés dans les deux grandes faces de la caisse de tôle, qui s'ouvrent à l'extérieur et dans les canaux GG, HH. Ces canaux, ces cylindres et ces ouvertures, sont environnés d'eau. M, M, M, M sont des entonnoirs qui surmontent les tubulures par lesquelles passent des agitateurs. N, N sont des tubulures traversées par les tiges des thermomètres. O est une pile thermo-électrique fixée dans le canal II, dans l'axe commun des deux tubes K, K et à égale distance de leurs extrémités voisines; ses pôles communiquent avec un rhéomètre très-sensible qui n'est point indiqué dans les figures. P, P, sont des écrans solidaires, mobiles autour des axes Q, Q, destinés à intercepter les rayons de chaleur qui arrivent à la pile par les tubes K, K. Les ouvertures rectangulaires LLLL sont destinées à recevoir les corps, dont les surfaces en regard de la pile, doivent agir sur elle; mais, comme les surfaces voisines de la pile doivent toujours être à la même dis-

tance de ses extrémités, les bords intérieurs des ouvertures LLLL sont garnis de quatre petits arrêts R,R,R,R contre lesquels les corps viennent s'appuyer; la figure 15, qui représente une des faces de la caisse, lorsque l'ouverture LLLL est libre, montre la disposition de ces arrêts.

L'une des ouvertures LLLL est toujours occupée par un vase en cuivre, ST (fig. 14), plein d'eau, garni de deux agitateurs et d'un thermomètre très-sensible; une partie de sa surface inférieure est disposée de manière que l'on puisse facilement la chauffer au moyen d'une lampe à esprit de vin; ce vase est environné d'un cadre en bois de sapin qui le sépare des bords de l'ouverture dans laquelle il est placé, afin d'éviter l'échauffement de l'eau de la caisse; le vase est fixé dans sa position par de petits coins en bois.

Dans l'autre ouverture, on place les plaques dont on veut mesurer la conductibilité; elles s'appuient sur les arrêts R,R,R,R, et sont chauffées sur l'autre face par la vapeur; leurs dispositions sont différentes suivant que les matières sont solides ou pulvérulentes. Dans la fig. 14 on a supposé qu'il s'agissait d'une matière solide; la fig. 16 représente, à une échelle double, la disposition de l'appareil; *abcd* est un vase rectangulaire en cuivre dont la face *ab* est percée d'une grande ouverture, comme on le voit dans les figures 17 et 18, qui représentent, la première la face *ab*, la seconde, une coupe du vase perpendiculaire à cette face. Le vase reçoit la vapeur par le tube *ef*, et l'eau condensée, ainsi que la vapeur en excès, s'échappant par le tube *gh*; une lame mince et étroite de caoutchouc est posée sur les bords de l'ouverture de la face *ab*, et, contre le caoutchouc, on applique la plaque que l'on maintient serrée par des tiges de cuivre terminées d'un côté par un crochet et de l'autre par un filet de vis et un écrou; le vase renferme un thermomètre qui donne la température de la vapeur, et il est environné d'un cadre en bois de sapin comme le vase à eau qui se trouve dans l'autre ouverture; on le fixe de même par des coins en bois. La figure 19 représente la disposition employée pour les matières pulvérulentes, toutes les faces du vase à vapeur sont pleines; il est environné du cadre en bois qui doit isoler des bords de l'ouverture LLLL, et le cadre est fermé par une lame mince de verre recouvert de papier sur les deux faces; le papier extérieur sert à fixer la lame de verre. La matière pulvérulente est placée entre le vase à vapeur et la lame de verre.

La figure 20 est une projection horizontale à une échelle de 0,04 de la pile thermo-électrique et de la disposition employée pour la placer. *abcd* est la pile, *e* et *f* sont deux appendices communiquant avec les pôles et auxquels sont fixées les extrémités des fils qui communiquent avec le rhéomètre. La pile est soutenue par deux tiges *g*, *h*, fixée à une boîte *ik*, traversée par une crémaillère *lm* qui engrène dans un pignon qu'on peut faire tourner par une clé; par cette disposition on peut amener la boîte au point convenable quand les deux faces qui rayonnent sur ses extrémités sont les mêmes et ont la même température. Pour qu'on puisse fixer la crémaillère, elle porte à ses extrémités deux tiges *p*, *n* qui se terminent chacune par un cercle taraudé intérieurement *q*, *r*; on visse dans ces cercles des cylindres qui passent dans les ouvertures K,K (fig. 15), et ces derniers sont maintenus en place par des calles en bois.

La figure 21 représente la disposition qui a été employée pour déterminer les rapports

des pouvoirs rayonnants des corps, et dont il a été question page 140. Dans les deux ouvertures LLLL de l'appareil précédent se trouvent deux vases de cuivre ; l'un est chauffé par la vapeur, l'autre renferme de l'eau dont on peut élever la température à un degré convenable ; les surfaces des vases sont recouvertes des matières dont on veut mesurer les rayonnements, celui qui rayonne le moins étant du côté de la vapeur. Pour le verre, j'ai employé l'appareil fig. 16, 17 et 18, l'ouverture du vase étant fermée par une lame mince de verre retenue par le moyen indiqué précédemment pour des plaques épaisses.

Les premières expériences ont été faites avec les matières déjà employées dans les autres modes d'expériences ; elles ont surtout été répétées sur l'édrédon pour lequel on n'a jamais remarqué d'anomalies, probablement parce que, en vertu de son élasticité, il se répand uniformément dans tout l'espace qu'il occupe. La surface de refroidissement ayant 0^m,15 de hauteur, d'après la formule (9), page 101, relative au refroidissement des surfaces planes par le contact de l'air, on avait $K' = 3,41$, et comme la surface rayonnante était de papier, K était égal à 3,77, par suite $K + K' = 7,18$, et $Q = 7,18 [1 + 0,0065(t' - t'')]$. Mais avec cette valeur de Q on trouve toujours des conductibilités trop petites, et, pour obtenir les mêmes résultats que dans les méthodes précédentes, il faut prendre pour $K + K'$ le nombre 8,64, c'est-à-dire multiplier la valeur de Q , déduite des formules du refroidissement, par 1,203. Cette anomalie m'a d'abord beaucoup étonné, mais, en y réfléchissant, on en voit bientôt la raison. Le refroidissement d'un corps par l'air ne provient pas seulement de son contact avec ce fluide, mais de la dispersion de la chaleur à travers l'air, dispersion qui doit être d'autant plus considérable, toutes choses égales d'ailleurs, que l'enceinte est plus rapprochée du corps, parce que la variation de température dans chaque tranche élémentaire augmente à mesure que la distance du corps et de l'enceinte diminue. Deux autres causes peuvent aussi exercer une certaine influence ; la valeur de K' , relative aux surfaces planes, n'est pas d'une grande précision, parce qu'elle résulte de la formule trouvée pour les cylindres verticaux, qui n'a été vérifiée que pour des rayons renfermés dans des limites assez restreintes, et dans laquelle on a supposé le rayon infini (page 101) ; en outre, dans l'appareil que je viens de décrire, l'air s'écoulait par un canal étroit qui devait agir comme une cheminée, et par conséquent les mouvements de l'air n'étaient pas les mêmes que quand le corps se refroidit dans une grande enceinte. Quoi qu'il en soit, dans toutes les expériences que je vais rapporter, les valeurs de Q déduites des formules du refroidissement ont été multipliées par 1,203.

Voici maintenant les principaux résultats obtenus.

Édrédon.

$$d = 0,015 ; e = 0^m,016 ; t = 99,90 ; t' = 29,36 ; t'' = 11,3 \dots \dots C = 0,039.$$

$$d = 0,030 ; e = 0^m,016 ; t = 99,83 ; t' = 28,15 ; t'' = 10,0 \dots \dots C = 0,039.$$

Sable quartzeux, le même que dans les expériences précédentes.

$$d = 1,47 ; e = 0,015 ; t = 100,3 ; t' = 65,00 ; t'' = 9,32 \dots \dots C = 0,277.$$

Sciure de bois d'acajou ordinaire.

$$d = 0,32; e = 0,016; t = 99,88; t' = 40,20; t'' = 14,30 \dots\dots\dots C = 0,0700.$$

Sciure de bois d'acajou passée au tamis de soie.

$$d = 0,407; e = 0,016; t = 99,45; t' = 40,21; t'' = 11^{\circ} \dots\dots\dots C = 0,0800.$$

$$d = 0,420; e = 0,016; t = 100; t' = 40,53; t'' = 11,2 \dots\dots\dots C = 0,0805.$$

Terre cuite.

$$d = 1,98; e = 0,0175; t = 100,1; t' = 77,35; t'' = 12,8 \dots\dots\dots C = 0,60.$$

$$d = 1,85; e = 0,025; t = 100,6; t' = 67,89; t'' = 11,0 \dots\dots\dots C = 0,510.$$

$$d = 1,85; e = 0,025; t = 100,4; t' = 68,04; t'' = 12,6 \dots\dots\dots C = 0,500.$$

$$d = 1,85; e = 0,025; t = 100,4; t' = 70,44; t'' = 20 \dots\dots\dots C = 0,493.$$

Briques pilées passées au tamis de soie.

$$d = 1,21; e = 0,016; t = 99,95; t' = 58,85; t'' = 11,25. \dots\dots\dots C = 0,209.$$

Marbre blanc saccharoïde.

$$d = 2,76; e = 0,015; t = 100,65; t' = 94,70; t'' = 11,2 \dots\dots\dots C = 2,80.$$

$$d = 2,77; e = 0,039; t = 98,8; t' = 86,74; t'' = 12,2 \dots\dots\dots C = 3,10.$$

$$d = 2,77; e = 0,039; t = 100,2; t' = 86,95; t'' = 12,4 \dots\dots\dots C = 2,81.$$

Marbre gris à grain fin.

$$d = 2,68; e = 0,0215; t = 100,8; t' = 94,32; t'' = 13,9 \dots\dots\dots C = 3,51.$$

Pierre calcaire à grain fin.

$$d = 2,17; e = 0,014; t = 100,33; t' = 90,25; t'' = 10,4 \dots\dots\dots C = 1,70.$$

$$d = 2,277; e = 0,025; t = 100,00; t' = 86,12; t'' = 11,8 \dots\dots\dots C = 1,71.$$

$$d = 2,277; e = 0,025; t = 100,00; t' = 86,51; t'' = 12,3 \dots\dots\dots C = 1,74.$$

$$d = 2,343; e = 0,031; t = 100,65; t' = 86,98; t'' = 14,10 \dots\dots\dots C = 2,10.$$

Plâtre commun très-fin.

$$d = 1,25; e = 0,215; t = 100,2; t' = 72,61; t'' = 16,00 \dots\dots\dots C = 0,522.$$

Plâtre de moulage très-fin.

$$d = 1,25; e = 0,215; t = 100,2; t' = 68,24; t'' = 12,10 \dots\dots\dots C = 0,445.$$

Plâtre aluné fin.

$$d = 1,73; e = 0,0215; t = 100,5; t' = 74,04; t'' = 10,2 \dots\dots\dots C = 0,634.$$

Verre.

$$d = 2,44; e = 0,0125; t = 100,21; t' = 84,90; t'' = 12 \dots\dots\dots C = 0,745.$$

$$d = 2,550; e = 0,019; t = 100,84; t' = 82,01; t'' = 11,8 \dots\dots\dots C = 0,891.$$

Bois de sapin, plaque taillée parallèlement aux fibres.

$$d = 0,48; e = 0,012; t = 100,3; t' = 50,93; t'' = 11,3 \dots\dots\dots C = 0,104.$$

Bois de chêne, plaque taillée parallèlement aux fibres.

$$d = 0,61; e = 0,061; t = 99,9; t' = 69,24; t'' = 11,5 \dots\dots\dots C = 0,269.$$

Liège.

$$d = 0,22; e = 0,026; t = 100,8; t' = 41,35; t'' = 9,8 \dots \dots \dots C = 0,143.$$

$$d = 0,22; e = 0,026; t = 100,0; t' = 40,37, t'' = 9. \dots \dots \dots C = 0,140.$$

Gutta-percha.

$$d = \dots \dots e = 0,026; t = 100,1; t' = 44,31; t'' = 9,1. \dots \dots \dots C = 0,174.$$

Caoutchouc.

$$d = \dots \dots; e = 0,0105; t = 100,4; t' = 60,09; t'' = 10,9. \dots \dots \dots C = 0,150.$$

$$d = \dots \dots; e = 0,0105; t = 100,2; t' = 62,70; t'' = 11,0. \dots \dots \dots C = 0,147.$$

On pourrait craindre, comme dans la seconde méthode, que, pour les matières pulvérisantes et pour les matières textiles, la lame de verre n'eût une influence sensible, mais il est facile de reconnaître qu'ici, comme pour les enveloppes cylindriques, page 163, cette influence est complètement négligeable. En résolvant l'équation (G) par rapport à C, on trouve, comme pour l'équation (D), que l'influence de l'enveloppe dépend du second terme du dénominateur de la valeur de C; or, pour le sable et l'édrédon, ce second terme est inférieur à 0,008 et 002 du premier, ainsi il peut être négligé.

J'avais le projet de déterminer la conductibilité de différents corps plus ou moins humides, de l'eau rendue immobile par une quantité plus ou moins grande de fécule, de la résine, de la cire, du suif; les expériences auraient pu être faites en employant le chauffage à la vapeur et deux plaques, dont l'une aurait servi à abaisser la température de la source de chaleur; mais, comme contrôle de ces expériences, je désirais faire des expériences directes au moyen d'une seule plaque, et j'ai été arrêté par la difficulté de produire un chauffage constant à une température très-inférieure à 100°.

Chacun des corps sur lesquels les expériences ont été faites, dans les différentes méthodes qui ont été employées, a une constitution physique qui n'est pas toujours la même; or, comme la conductibilité varie avec la densité, excepté pour les matières textiles, qu'elle change avec l'état d'humidité des corps, pour les bois avec la direction des fibres, pour les marbres et les pierres, avec leur état de cristallisation; il s'ensuit que les nombres que nous avons trouvés, même en les supposant d'une parfaite exactitude, ne conviennent rigoureusement qu'aux matières sur lesquelles les expériences ont été faites. Pour les corps de même désignation, la conductibilité peut varier dans des limites plus ou moins étendues, mais les nombres que nous avons obtenus peuvent être considérés comme des approximations suffisantes pour toutes les applications.

FIN.

NOTES.

Dans le second chapitre de cet appendice, pour me conformer à l'usage, j'ai parlé de la chaleur provenant du refroidissement des corps par le rayonnement et par le contact de l'air, quoique les formules ne s'appliquent réellement qu'à des corps dont la température reste constante. A la rigueur, les titres des deux paragraphes auraient dû être ceux-ci : *Quantités de chaleur perdues par la surface d'un corps, maintenue à une température constante, par le rayonnement ou par le contact de l'air* ; j'ai conservé les anciennes dénominations, parce que les quantités de chaleur perdues quand la température reste constante se déduisent des vitesses du refroidissement, et qu'il ne peut pas y avoir d'ambiguïté. Quant au refroidissement réel d'un corps dont tous les points ont à chaque instant la même température, à ses variations en fonctions du temps, c'est une question très-compliquée dont on n'a point l'occasion de s'occuper dans les applications.

En parlant, page 129, de la correction relative à la partie de la tige du thermomètre qui n'est point plongée dans l'eau, j'ai fait une omission que je m'empresse de réparer. M. Regnault a reconnu depuis longtemps, qu'en supposant que la température moyenne de la colonne de mercure qui dépasse le liquide soit égale à celle indiquée par un petit thermomètre dont le réservoir est placé au milieu de la hauteur de cette colonne, on obtient le même résultat que si le thermomètre était entièrement plongé dans le liquide.

J'ai également oublié de dire, en parlant du pouvoir rayonnant des corps, que M. Masson avait reconnu que toutes les matières en poudre très-fines, obtenues par précipitation et non cristallisées, avaient le même pouvoir émissif.

ERRATA.

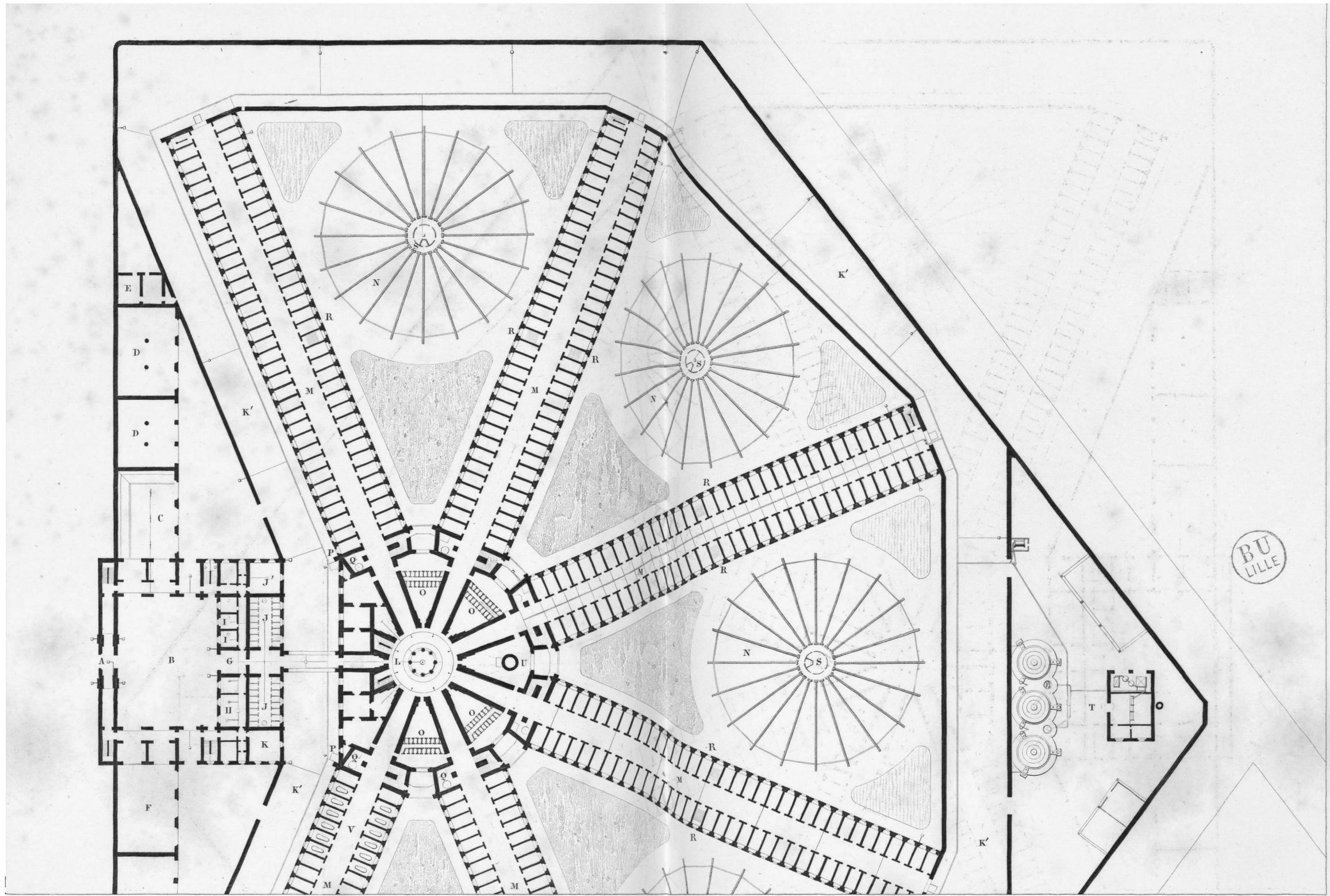
Page 105, ligne 3, en remontant.....	C = 1,27, lisez C = 1,70
Page 106, ligne 12, en descendant.....	C = 0,103, lisez C = 0,143
» » ligne 13, en descendant.....	C = 0,148, lisez C = 0,170
» » ligne 20, en descendant.....	d = 1,76, lisez d = 1,16

FIN DES NOTES.

TABLE DES MATIÈRES.

CHAP. I^{er}.	RAPPORTS ET MÉMOIRES RELATIFS AU CHAUFFAGE ET A LA VENTILATION	Page 1
	§ 1. Prison Mazas	1
	§ 2. Prison cellulaire de Provins	22
	§ 3. Prison cellulaire de Tours	25
	§ 4. Chauffage de l'église Saint-Roch	31
	§ 5. Chauffage et ventilation du grand amphithéâtre du Conservatoire	40
	§ 6. Chauffage et ventilation de la salle des séances de l'Institut	56
	§ 7. Chauffage et assainissement de l'Hôpital du Nord	57
	§ 8. Ventilation du dépotoir de La Villette	60
	§ 9. Chauffage et ventilation des ateliers de cristallerie de Baccarat	64
	§ 10. Observations sur les différents modes de chauffage et de ventilation	66
CHAP. II.	FORMULES USUELLES RELATIVES AU REFOIDISSEMENT ET A LA TRANSMISSION DE LA CHALEUR..	97
	§ 1. Formules usuelles relatives au refroidissement	97
	§ 2. Formules usuelles relatives à la transmission de la chaleur à travers les corps	104
CHAP. III.	NOUVELLES RECHERCHES SUR LA TRANSMISSION DE LA CHALEUR A TRAVERS LES CORPS MAU-	
	VAIS CONDUCTEURS	122
	§ 1. Recherches sur le refroidissement	122
	§ 2. Recherches sur la transmission à travers les corps mauvais conducteurs	150

Imprimerie de Ch. Lahure (ancienne maison Crapelet)
rue de Vaugirard, 9, près de l'Odéon.



Librairie de L. Hachette et C.^{ie}

Gravé par E. Wormser.

Fig. 1.

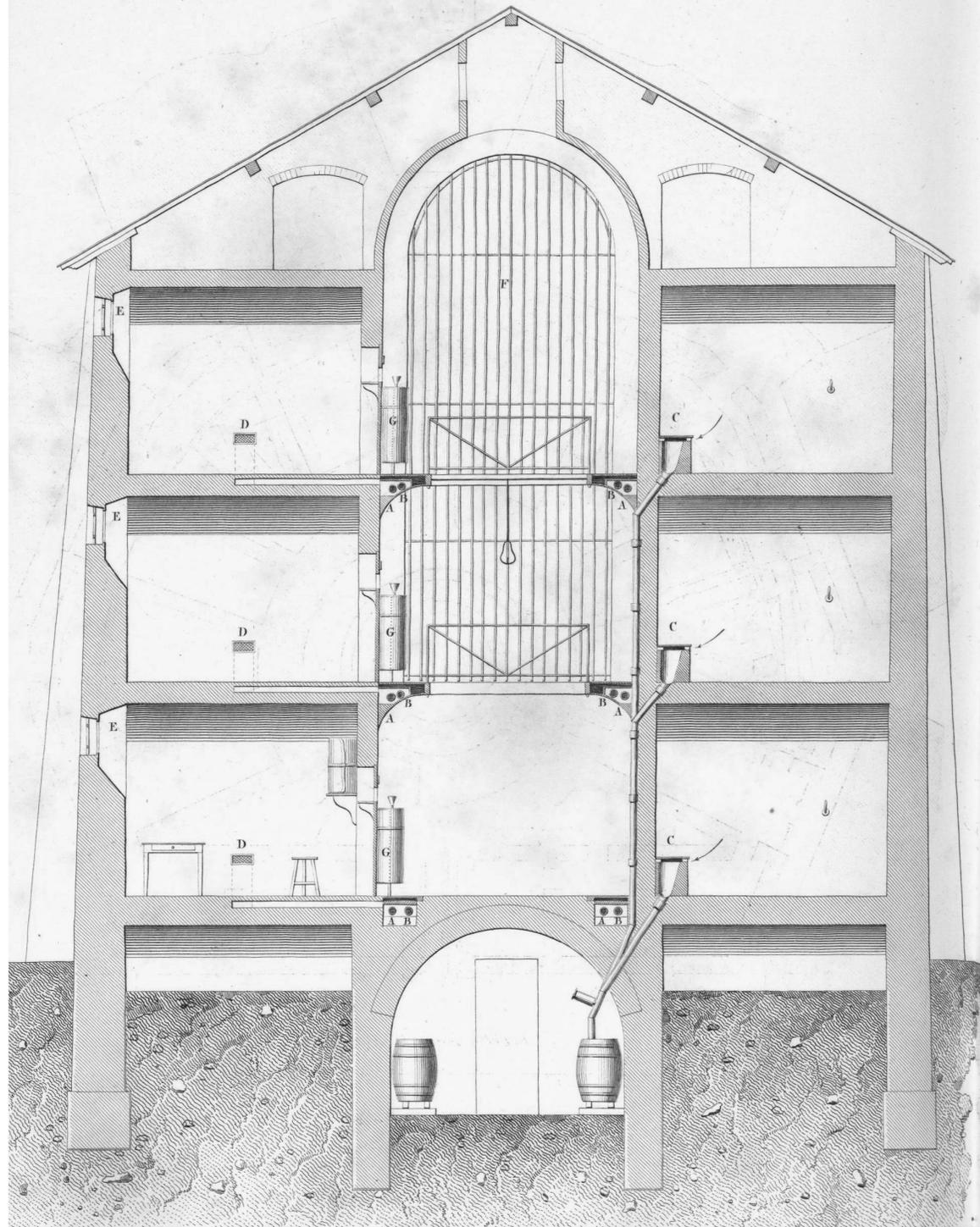
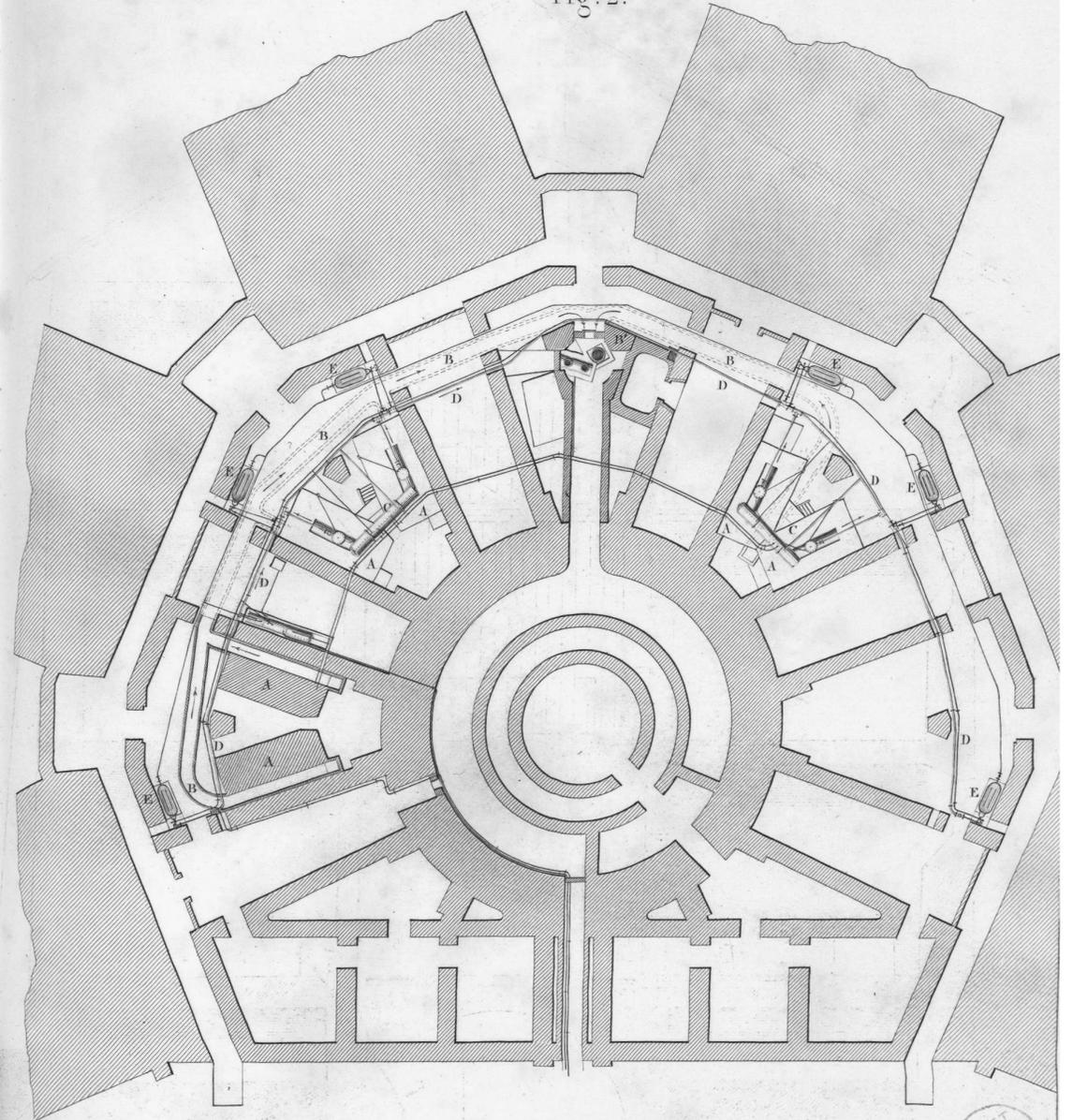
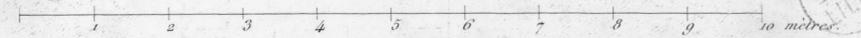


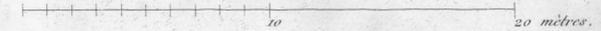
Fig. 2.

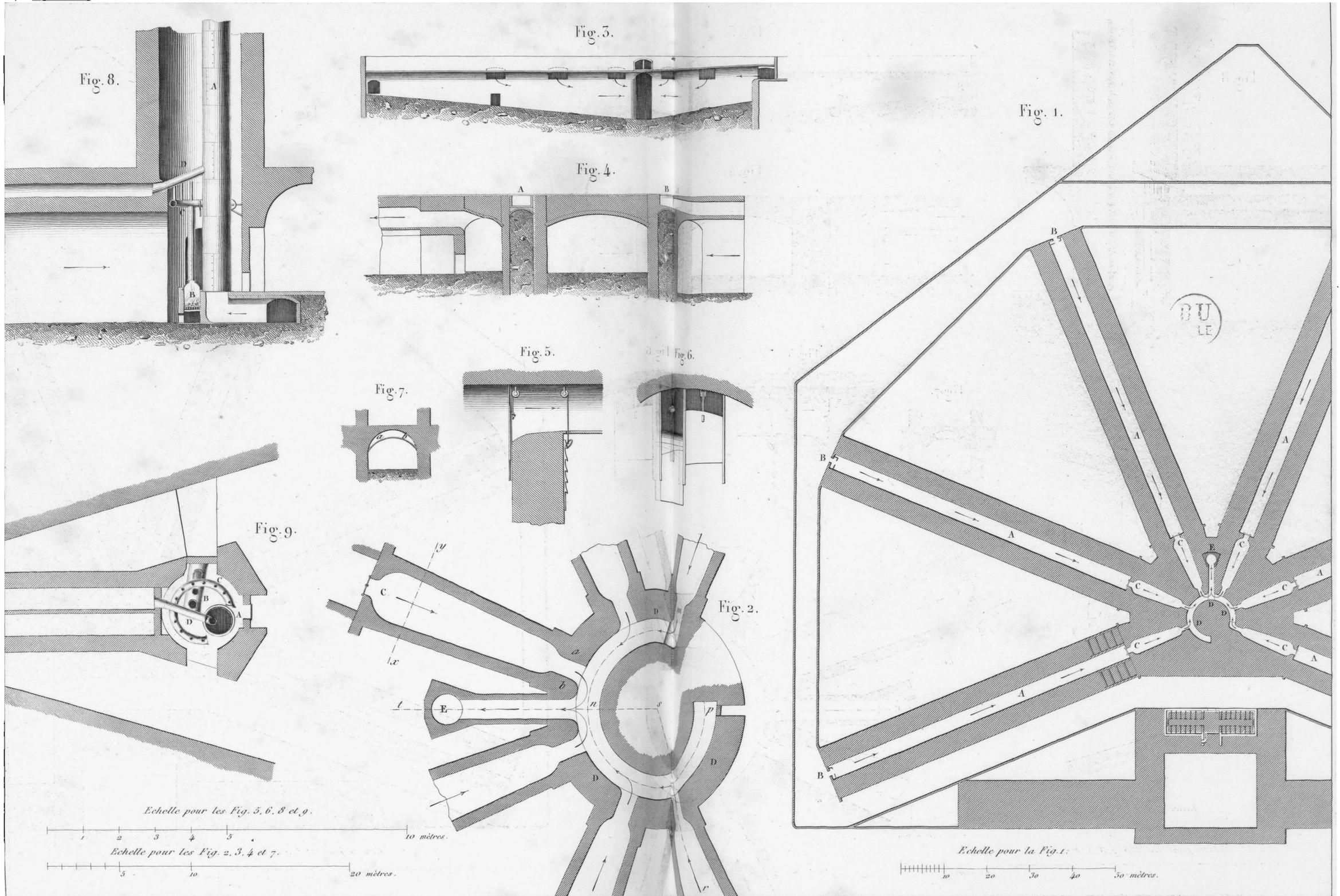


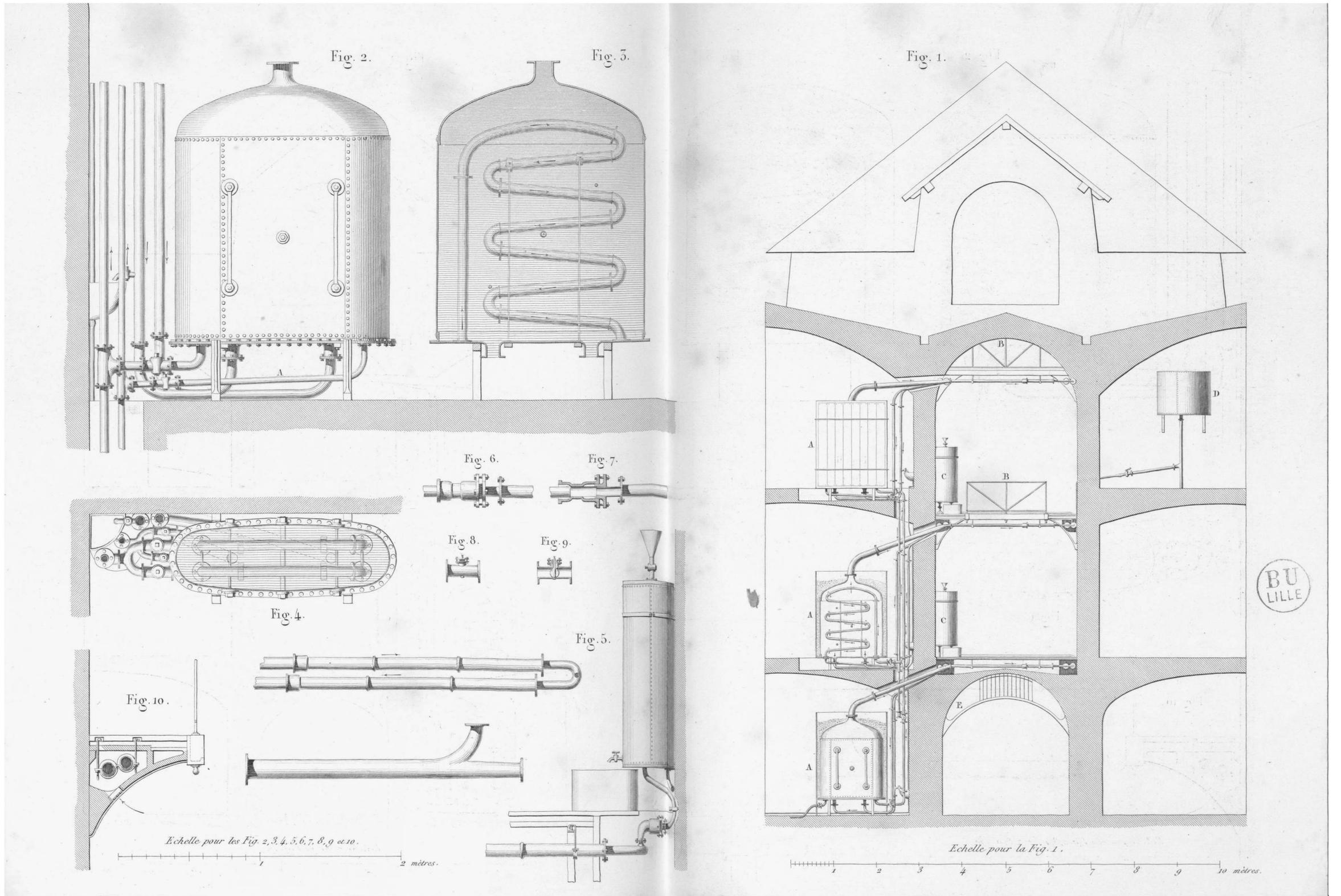
Echelle pour la Fig. 1.

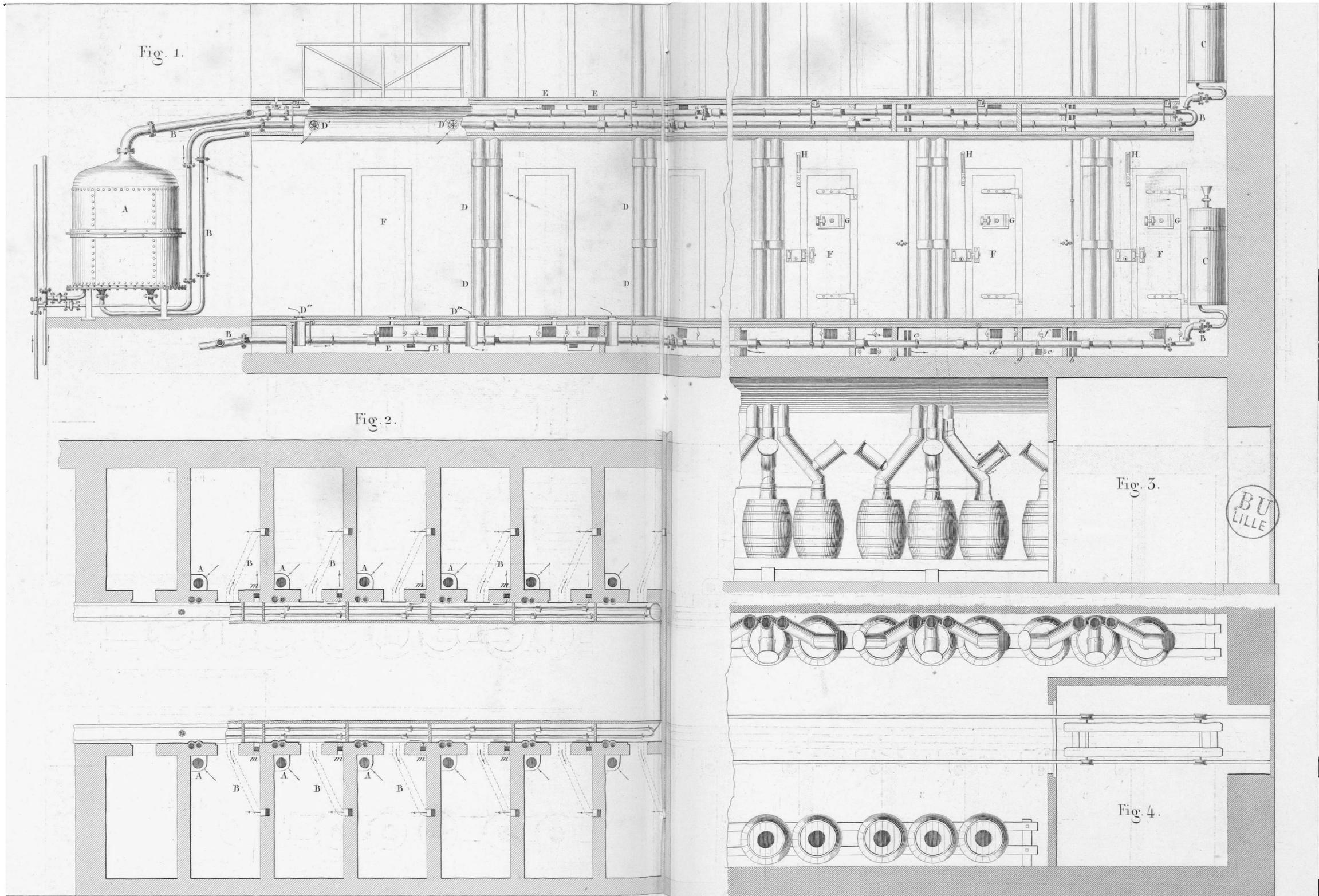


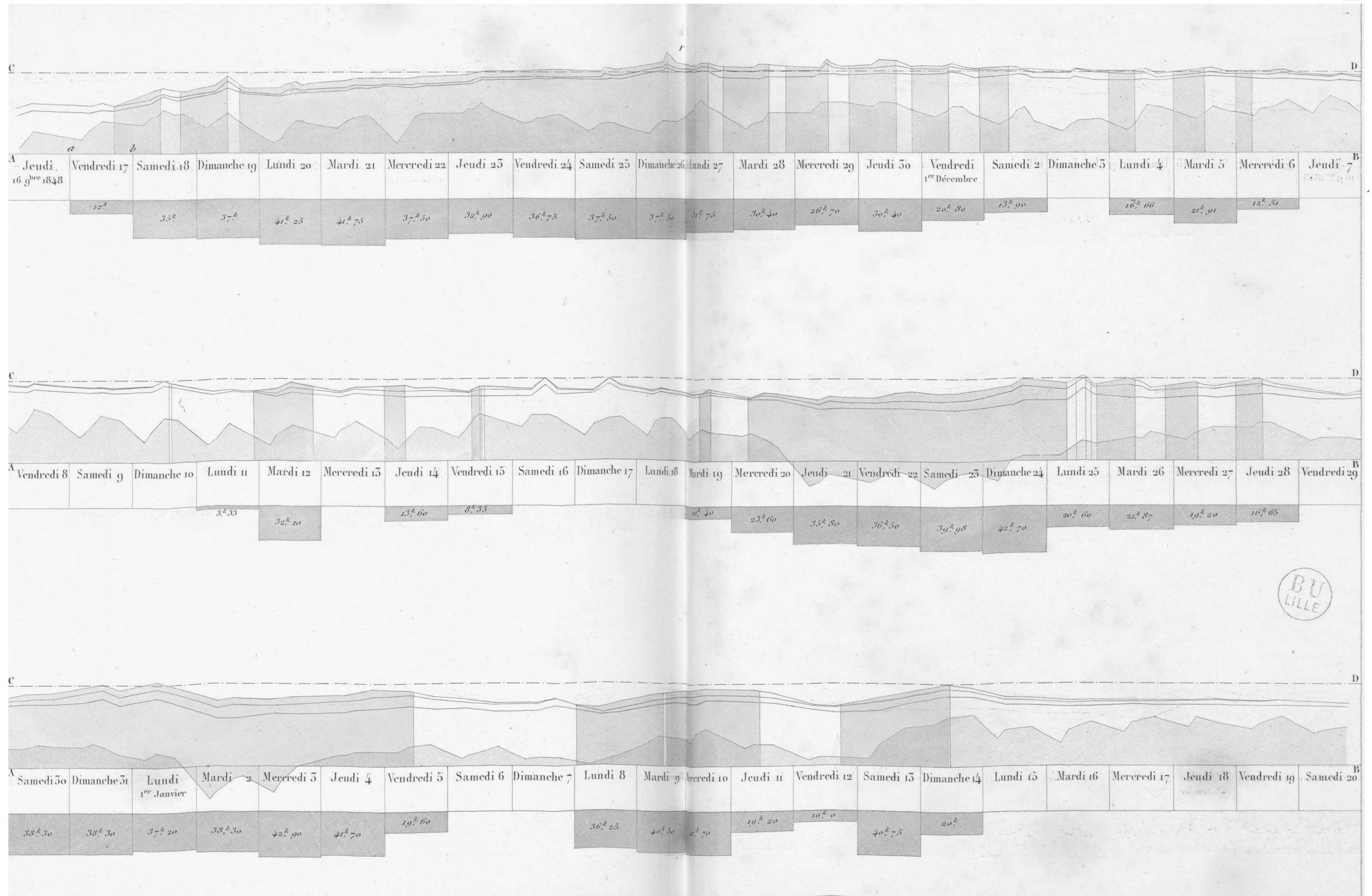
Echelle pour la Fig. 2.



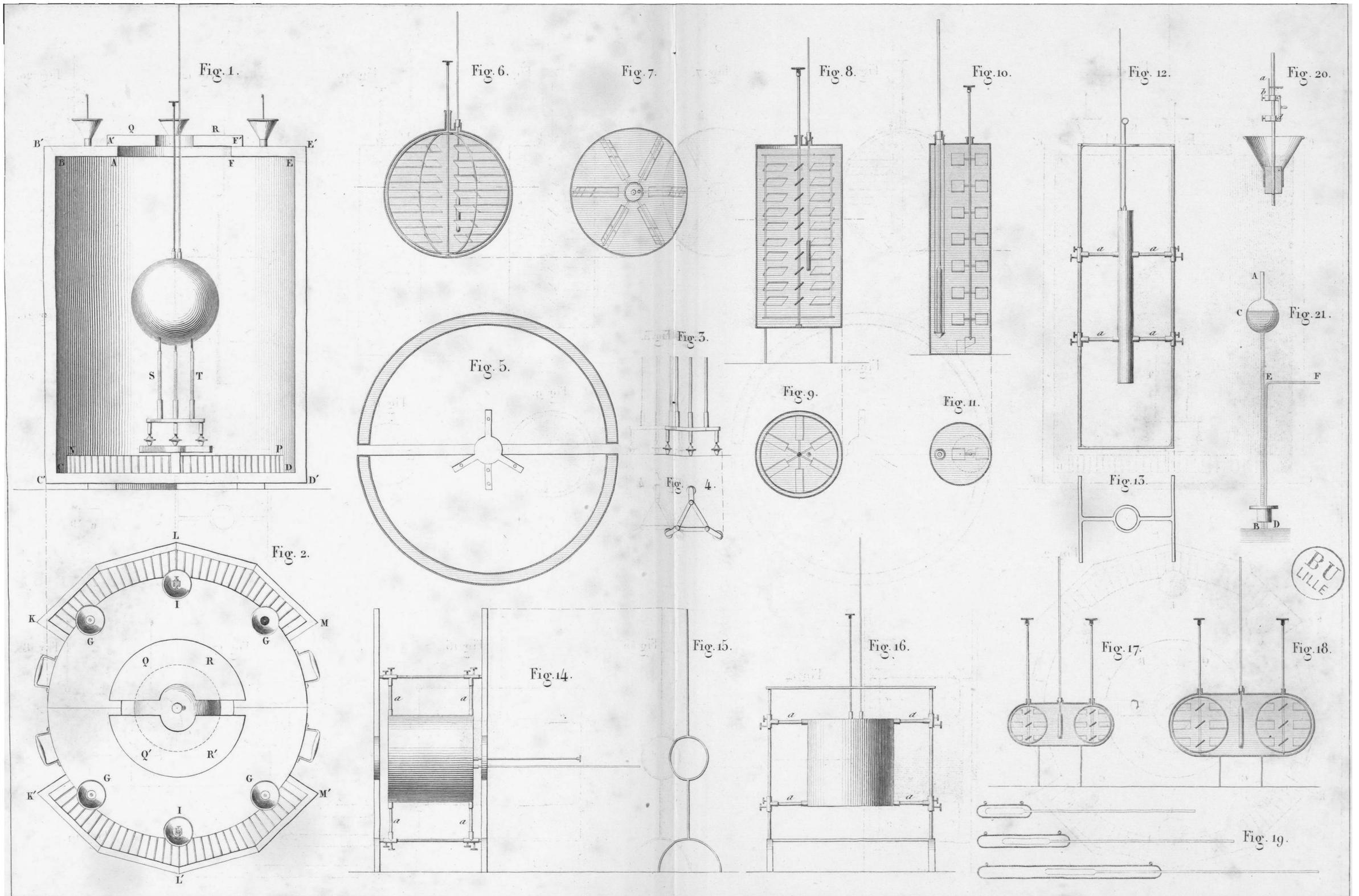








BU
LILLE



BU
LILLE

