

Les effets de la température et de l'hygrométrie sur la justesse d'un orgue

Emmanuel DEMARS, acousticien

Quelle est l'incidence des changements de température et d'hygrométrie sur la propagation du son et sur l'acoustique d'un lieu ?

EMMANUEL DEMARS :

La propagation du son se définit par deux critères :

- La vitesse du son (appelée célérité du son)
- L'absorption ou atténuation
du son en se propageant dans l'air

La vitesse du son (c) dépend de la température suivant une formule très simple :

$$c = 20,01 \sqrt{T}$$

« c » s'exprime en m/s et « T » en °K

(température absolue = température en °C + 273,15)

Dans l'air sec à 20°C, la vitesse du son est de

$$20,01 \sqrt{(20 + 273,15)} = 342 \text{ m/s, soit } 1\,232 \text{ km/h.}$$

L'hygrométrie augmente très peu la vitesse du son. Elle est complètement négligeable en dessous de 10°C et à 20°C, la vitesse du son varie de 1 m/s entre une humidité de 0% et 85%, soit 342 m/s pour 0% et 343 m/s pour 85%, soit une augmentation de 0.3 %, alors qu'une augmentation de 10° augmente la vitesse de 1.8% (de 10°C à 20°C).



La fréquence (hauteur du son) perçue par un auditeur ne dépend pas de la vitesse du son, sauf si l'auditeur et la source de bruit sont en mouvement l'un par rapport à l'autre. C'est l'effet Doppler, dont l'exemple le plus connu est la sirène d'une ambulance plus aigüe lorsqu'elle se rapproche que lorsqu'elle s'éloigne.

Pour de grandes distances (plusieurs centaines de mètres), l'absorption atmosphérique joue un rôle important dans la propagation.

Les aigus sont nettement plus atténus avec la distance que les graves. Le tonnerre n'est souvent perceptible que dans un grondement sauf si l'on est très près où l'on réalise que tout le spectre est excité.

La température et l'hygrométrie influent dans le même sens : plus il fait chaud ou plus il fait humide et moins il y a d'absorption atmosphérique et mieux le son se propage.

Dans le cadre d'une salle (ou d'une église), les phénomènes liés à la température et à l'hygrométrie sont imperceptibles sur l'acoustique du lieu, sauf si certains composants du lieu vont avoir un comportement lié à ces paramètres, mais je n'ai pas d'exemple connu.

La présence de public dans une salle va changer l'acoustique du lieu en raison des vêtements (absorbants) qui sont ajoutés. Ceci est vrai uniquement dans les acoustiques très réverbérantes, cet impact est négligeable dans les acoustiques plus feutrées.

Une église (souvent très réverbérante) ne sonne pas du tout de la même manière à vide et remplie.

Pourquoi un tuyau à bouche se désaccorde-t-il lorsque la température est modifiée ?

E.D. : La première chose à comprendre est la raison de la hauteur du son dans un tuyau à bouche.

L'onde sonore se propage dans le tuyau et « rebondit » aux deux extrémités (côté bouche et côté ouverture, qu'elle soit ouverte ou bouchée).

Exactement de la même manière que pour une corde de piano, il y a une résonnance lorsque la longueur du tuyau correspond à la demi-longueur d'onde liée à la fréquence. L'aller / retour du son va avoir la même durée que l'oscillation du son.

Pour les tuyaux bouchés, il s'agit du 1/4 de la longueur et non de la 1/2.

De nombreux articles sur internet expliquent ce phénomène sur lequel je ne vais pas m'attarder.

En ce qui concerne le changement de température, plusieurs phénomènes entrent en ligne de compte avec des ordres de grandeurs différents et antagonistes.

Observons le phénomène de dilatation.

Les dimensions d'un « corps » (solide liquide ou gazeux) augmentent en fonction de sa température.

Les liquides se dilatent nettement plus que les solides, et les gaz, nettement plus que les liquides.

Donc, l'augmentation de la température sur un tuyau à bouche a les conséquences suivantes :

- La longueur du tuyau augmente
- Le gaz se dilate et donc la vitesse du son augmente comme vu précédemment.

Ces deux phénomènes sont opposés sur la hauteur du son du tuyau :

- L'augmentation de la longueur rend le tuyau plus grave

- L'augmentation de la vitesse du son fait que l'onde fait un « aller / retour » plus vite, donc la fréquence est plus élevée et le tuyau est plus aigu.

Mais, en proportion, l'augmentation de la longueur du tuyau est infime par rapport à l'augmentation de la vitesse du son.

Le seul phénomène « sensible » est donc l'augmentation de la vitesse du son dans l'air.

Comme la fréquence (f) de résonnance du tuyau (sa hauteur au sens musical) est directement liée à sa longueur (L) par la formule $f = c/2L$ (c = vitesse du son), une augmentation de 1,8% de la vitesse du son (augmentation de 10°C à 20°C) augmenta la fréquence du tuyau de 1,8% aussi.

Un La (440 Hz) à 10°C passe à 448 Hz à 20°C. Pas si négligeable dans la mesure où le sib est à 466 Hz.

Les tuyaux en métal, en bois ou à anche se comportent-ils de la même manière en cas de changement de température et d'hygrométrie ?

E.D. : Etudions les anches.

La fréquence de résonnance (f) de l'anche, qui donne la hauteur du son, dépend de plusieurs paramètres :

- Sa longueur (L)
- Son épaisseur (h)
- Sa raideur (le « module d'Young » E)
- Sa masse volumique (ρ)

$$f = 0.161 \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Lorsque la température augmente, la languette se rallonge et elle s'assouplit (le métal devient de plus en plus souple en chauffant, jusqu'à devenir « mou » lorsqu'il est rouge).

Il en résulte une baisse de la hauteur du son en augmentant la température.

Si l'on veut quantifier cette variation, il est indispensable de connaître le comportement des différents paramètres en fonction de la température.

La longueur (et l'épaisseur) sont régis par la loi régissant la dilatation :

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

Avec α le coefficient de dilatation du matériau (0,000 018 5 pour le laiton) et L_0 la longueur initiale.

La masse volumique est elle aussi sujette à cette variation.

Une étude⁽¹⁾ a montré que pour les quelques métaux étudiés, le module d'Young (E) évolue de manière suivante en fonction de la température (T) :

$$1 - E/E_0 = A T^{3/2}$$

Avec E_0 module d'Young extrapolé à 0°K et $A \sim 0.000 01$ (pour l'acier, valeur que nous appliquerons au laiton par manque de littérature...)

Reprendons l'exemple d'une augmentation de 10°C à 20°C. Une anche de 440 Hz à 10°C passera à environ à 439,4 Hz.

En résumé, une augmentation de 10°C à 20°C a les effets suivants :

Température	10°C	20°C
Tuyau à bouche	440 Hz	448 Hz
Anche	440 Hz	439,4 Hz

L'hygrométrie n'a aucune incidence sur les tuyaux métalliques (bouches ou anches).

L'influence de l'hygrométrie sur le bois est faible mais dans le sens de fibres du bois. L'augmentation de la longueur du tuyau en bois est donc négligeable.

Par contre, ce n'est pas l'objet des questions qui me sont posées, l'hygrométrie peut engendrer des variations « non négligeables » au niveau de la pression et donc de la vitesse du jet de l'air dans la bouche.

Une augmentation de la pression vient modifier la condition limite et artificiellement « réduire » la taille du tuyau qui sonne donc plus aigu.

(1) A. Jaquierod & H. Mügeli dans la revue Helvetica Physica Acta de 1928

Eric BROTTIER, technicien-conseil

Les variations de température ont-elles des conséquences sur la justesse d'un orgue ?

ERIC BROTTIER : On ne peut aborder ce sujet sans préalablement parler non seulement de justesse mais aussi de diapason.

En fonction des saisons, la température change. Un orgue d'église est donc soumis à des variations de température qui peuvent être plus ou moins importantes, ce qui n'est pas généralement le cas des orgues de salles de concert. Dans une église non ou peu chauffée, la variation de température été/hiver peut facilement atteindre et même dépasser 25° Celsius.

Par exemple, à Juvigny (Marne), en hiver, l'eau peut geler dans les bénitiers, donc la température peut descendre en dessous de 0°C et en période de canicule être de 25 °C, voire plus encore.

Il en résulte que le diapason change en raison du fait que la vitesse du son dépend de la température.

Pour les tuyaux à bouche, la fréquence du son (donc la note émise) est directement liée à la température. Si l'orgue est au La 440 Hz à 20°C, le ton sera de 424,7 à 0°C et 443,7 à 25°C, ceci pour les tuyaux à bouche. Heureusement, si l'orgue est étanche et non défectueux, l'ensemble des tuyaux à bouche reste juste entre eux, mais ce ne sera pas le cas des tuyaux à anche dont le principe de génération de son est complètement différent (languette vibrante avec résonateur). Ces jeux, selon qu'ils sont à corps longs (Trompette) ou courts (Voix humaine, Régale) n'évolueront déjà pas de la même façon entre eux et encore bien différemment par rapport aux jeux à bouche. Donc si on ne les accorde pas régulièrement, l'orgue devient

faux par dispersion d'accord des jeux d'anches entre eux et aussi par rapport aux jeux à bouche.

Les variations d'hygrométrie ont-elles un effet similaire ?

E.B. : Dans la pratique, d'autres éléments interviennent sur la justesse d'un orgue entre été et hiver, c'est le cas, plus pernicieux, où l'orgue possède des sommiers à registres dont l'enchapage n'est plus étanche ou s'il est construit de façon traditionnelle avec des sommiers dans lesquels les tables, registres et chapes sont en bois, ou encore selon le type d'enchapage : bois sur bois, bois sur peaux ou rondelles, etc...

Dans ce cas c'est l'hygrométrie qui va devenir, plus que la température, l'élément qui est susceptible de jouer sur la justesse de l'orgue.

En été, les bois ont un teneur hygroscopique moindre qu'en hiver, saison au cours de laquelle cette teneur est plus élevée : les bois sont plus humides et « gonflent ». En été les bois se dessèchent et se rétractent. En hiver, le jeu qui existe entre table, registre et chape est faible : les fuites à l'enchapage sont faibles voire inexistantes. Il n'y a pas (ou très peu) de perte de vent à l'arrivée de l'air au pied du tuyau et le tuyau parle avec le débit d'air qui lui convient et qui a été déterminé et réglé par l'harmoniste. En été les registres sont plus minces : avant d'entrer dans le pied du tuyau, il y a une perte dans le flux d'air qui se dissipe entre le registre et la chape ou la table : le tuyau ne recevra plus tout à fait le débit d'air optimal : il y a une perte de pression et la hauteur du son risque de fluctuer à la baisse et ce, de façon aléatoire d'une note à l'autre selon la taille et la position des tuyaux et l'orgue devient faux car plus rien n'est calé. La fausseté devient de plus en plus nette que les tuyaux sont aigus, d'où fréquemment la fausseté des mixtures les premières concernées. Et cet inconvénient s'ajoute à la question précédente liée aux variations de diapason.



Eric Brottier à l'orgue de Juvigny (51)



Orgue de Juvigny (1663)

Pascal QUOIRIN, facteur d'orgue

Comment gérez-vous les questions relatives aux changements de température et d'hygrométrie dans le cadre d'une construction d'orgue ?

PASCAL QUOIRIN : A l'atelier nous garantissons ce que nous construisons, à condition que la variation hygrométrique ne descende pas en dessous de 40% et ne dépasse pas 70%. En hiver, les effets et désordres sur la partie instrumentale dues à un taux d'humidité dépassant cette limite de 70% sont bien plus significatifs qu'en été, où ça l'est moins. Les conditions hygrométriques sont donc relatives, il faudrait faire une étude technique précise pour comprendre ce rapport entre hygrométrie et température et les effets sur les parties instrumentales d'orgues, comme d'ailleurs sur tous les instruments de musique.

Auriez-vous des exemples d'instruments dont le fonctionnement est lié à ces deux paramètres ?

P.Q. : L'orgue de la cathédrale d'**Evreux** n'est pratiquement pas jouable lorsque la température à l'intérieur de l'édifice est aux environs de 6°, 7° et le taux d'humidité à 98% ! Ce sont les conditions habituelles de cette cathédrale pendant toute la période hivernale. Au printemps, l'hygrométrie baisse un peu mais, en revanche, la température remonte à 13°, 14 °. L'orgue se décoince peu à peu tout seul.

Fin juin, tout est en ordre, l'hygrométrie descend

autour de 60% et la température est de l'ordre de 18°, 20°.

Pour faire baisser l'hygrométrie excessive

durant la période d'hiver, nous avons installé
deux déshumidificateurs.

Ils sont en marche en permanence.

L'hiver ces deux appareils évacuent l'équivalent
de 40 à 50 litres d'eau par semaine ce qui fait baisser
l'hygrométrie seulement de quelques pourcents !

C'est en fait la cathédrale entière qu'il faudrait déshumidifier.



*Orgue P. Quoirin
de la cathédrale d'Evreux*

Quelles solutions pouvez-vous alors mettre en place ?

P.Q. : L'orgue de **Mont saint Aignan** (Rouen), construit intégralement en chêne massif s'est complètement coincé dès le premier hiver. Il a fallu ressortir toute la tuyauterie pour reprendre l'enchapage (réglage des chapes et registres). Les chapes des sommiers ont été remontées, et simplement posées sans aucune pression sur les registres, les clous forgés étant là uniquement pour le positionnement latéral. Lorsque l'hygrométrie remonte l'hiver autour de 100% avec une température de 6° à 7°, les registres gonflent et soulèvent les

chapes, il n'y a donc aucun coincement. L'orgue est parfaitement utilisable. Les autres différents réglages des niveaux mécaniques ont été réalisés en même temps que les interventions sur les chapes et registres lorsque l'hygrométrie et la température se situaient dans ces niveaux extrêmes. L'été, les registres diminuent d'épaisseur et les chapes suivent le mouvement. La compression du sommier est exactement la même, été comme hiver.

A la suite de cette expérience, nous avons compris pourquoi les anciens intercalaien plusieurs épaisseurs de peau entre la tête des clous forgés et le dessus des chapes. Cette méthode permet à la chape de suivre les variations d'épaisseur du registre et ainsi de ne jamais coincer. En **Bolivie**, à **Sucre** (*3800 mètres d'altitude*), nous avons restauré un instrument du 18^{ème} siècle, où nous avons pu constater que les chapes étaient simplement posées sur l'ensemble des registres et faux registres. Le maintien latéral étant assuré par des très astucieux assemblages des chapes entre elles. Le fonctionnement du sommier est complètement stabilisé.

L'orgue de **Matoury**, Guyane Française, est un autre exemple. La température est en permanence de 35°, 37° et l'humidité ne varie pas : 95 %. Après une période d'adaptation à ces conditions particulières, une mise à niveau a été nécessaire. Ces conditions climatiques étant stables, les réglages sont constants.

Aujourd'hui, avec le réchauffement climatique, il pleut beaucoup moins en Guyane.

Le niveau hygrométrique va descendre

sans que la température baisse vraiment.

Une nouvelle intervention sera très certainement nécessaire.



*Orgue P. Quoirin
de l'église St Michel de Matoury (Guyane)*

En résumé, le couplage hygrométrie / température provoque des variations dimensionnelles des constituants en bois massif des parties instrumentales. Les conséquences sont des désordres simples : cornements, registres durs à tirer... Le rétablissement se fait naturellement lorsque le niveau Température / hygrométrie redevient convenable.

En revanche une sécheresse excessive (en dessous de 40%) provoque également des variations dimensionnelles encore plus importantes qui iront jusqu'à l'éclatement des bois, l'apparition de gerces, de fentes dans les tables des sommiers. En général, ces dégradations sont irréversibles.

Le réchauffement climatique peut-il avoir des conséquences sur les orgues ?

P.Q. : Conséquence du réchauffement climatique, les attaques des xylophages sont devenues hyper actives et très fréquentes. Les dégradations sont bien plus importantes et bien souvent irréversibles, par rapport à celles provoquées par les variations hygrométriques.

Il faut bien comprendre et intégrer le fait qu'aujourd'hui il n'existe pas de traitement définitif contre ce fléau, les insectes s'immunisent progressivement et deviennent de plus en plus résistants aux produits de traitement. Seules des opérations complexes et coûteuses sont possibles pour stopper les infestations. La

surveillance régulière des orgues s'impose obligatoirement aujourd'hui. Il y va de la responsabilité des propriétaires (collectivités, Etat), des techniciens-conseils agréés et des organistes titulaires qui doivent maintenant se comporter comme des « Conservateurs » de l'instrument qui leur est confié.

Combien d'interventions sont nécessaires annuellement pour maintenir un orgue en état ?

P.Q. : En principe une intervention à chaque début de saison, soit **4 par ans**. Ce devrait être le minimum mais ce n'est que très rarement accepté. L'orgue Isnard de Saint Maximin (Var) est accordé **7 fois** par an, c'est un cas exceptionnel mais le climat de cette région est très capricieux, très froid en hiver (4° à 5°), très chaud en été (jusqu'à 41°), soit environ 35° à l'intérieur de l'édifice. La surveillance de ce chef d'œuvre de la facture française doit être constante. Actuellement, une très importante infestation des xylophages ravage les soufflets cunéiformes. On espère que les décisions qui s'imposent seront rapidement prises, sinon c'est tout l'instrument qui sera infesté.

Comment un facteur gère-t-il les problèmes de température et d'hygrométrie pour la construction d'un instrument ?

P.Q. : Pour des instruments importants, de styles polyvalents avec des parties électriques ou électroniques, il est préférable de construire avec des matériaux insensibles au variations températures / hygrométrie. Ceci est valable pour n'importe quel endroit de la planète. Il faut utiliser les bois reconstitués (panneaux multi-plis, médium de forte densité, panneaux tri-plis massif (chêne, sapin, etc..) lamellé-collé, etc... L'industrie propose un multitude solutions souvent bien adaptées pour résoudre les problèmes que nous rencontrons. Ces panneaux confectionnés avec des essences de bois de haute qualité sont cependant très coûteux. Il est aussi devenu indispensable d'utiliser ou d'intégrer le plus possible d'éléments métalliques dans les structures de charpentes, de prévoir aussi des systèmes de corrections automatiques des niveaux de transmissions. Et pour finir, traiter le plus intensément possible avec les produits les plus efficaces (lesquels ne peuvent être utilisés que par des professionnels de cette spécialisation) pour se prémunir de l'attaque des xylophages.

Les techniques « à l'ancienne » sont encore possibles pour des instruments simples et basiques à condition de choisir des essences de bois irréprochables et de d'usiner dans les règles de l'art. Mais, dans tous les cas, il faudra s'y reprendre à plusieurs fois pour stabiliser l'instrument.

Pour l'outre-mer, les bois à utiliser doivent nécessairement être d'essences locales aussi bien pour le bois massif que pour les bois recomposés.



Pascal QUOIRIN dans l'orgue de St Maximin (Var)

Le cas du clavecin et de l'harmonium

Comment réagit un clavecin face à ces changements de température et d'hygrométrie ?

Julien BAILLY : Les conséquences d'une hygrométrie basse peuvent être dommageables pour un clavecin à moyen et long terme. Par contre, les modifications de température vont avoir des effets directs sur l'accord. Plus la température s'élèvera, plus les cordes seront distendues, et plus le diapason baissera. C'est le phénomène inverse de celui que subit un tuyau d'orgue, dont l'accord montera avec une élévation de la température.

Pour accorder un clavecin et un positif, avant un concert, il est donc souhaitable d'accorder l'orgue légèrement plus bas que le diapason souhaité, le clavecin légèrement plus haut, les deux instruments retrouvant une parfaite harmonie sous l'effet des changements de température dus à la chaleur des projecteurs.

Les changements de température influencent-ils la justesse d'un harmonium ?

OLIVIER SCHMITT : Les anches libres ne sont pratiquement pas assujetties aux changements de températures (les variations sont négligeables) car, emprisonnées dans le sommier, leur métal (laiton) ne subit quasiment pas de dilatation et le vent qui passe furtivement n'a pas le temps de modifier leur température.

Propos recueillis par Pierre MEA