

Acoustique des bureaux ouverts

Victor Desarnaulds, Gillian Lüthi

¹EcoAcoustique SA, 24 av. Université, Ch-1004 Lausanne, Suisse
desarnaulds@ecoacoustique.ch

ECOACOUSTIQUE

SGA
SSA
Swiss Acoustical Society
Société Suisse d'Acoustique
Schweizerische Gesellschaft für Akustik
Società Svizzera di Acustica
Internet: www.sga-ssa.ch



Journées d'automne SSA-SGA, Kaiseraugst 22 nov. 2019



Bureau ouvert Google, Tel Aviv



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Quelques chiffres

- 80% des collaborateurs considèrent que leur environnement de travail les empêche de se concentrer (sondage Opinion Matters 2015)
- 11 minutes en moyenne, fréquence à laquelle un salarié est interrompu dans un open space (Mark et al 2005)
- 25 minutes, temps nécessaire à un employé pour revenir à son travail après avoir été interrompu (Mark et al 2005)
- 93% des collaborateurs se sentent gênés par le bruit au bureau (sondage Opinion Matters 2015)



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Bureaux ouverts -définition

Bureau ouvert

Espace ouvert

Open space

Espace partagé

<< Espace de travail conçu pour accueillir plus de 5 personnes sans séparations complètes entre les postes >>

Grand nombre de personnes peut travailler, converser, ou se concentrer de manière indépendante (ISO 3382-3)

Un modèle d'aménagement en vogue

- 14 % des salariés du tertiaire (40 % en bureaux collectifs)
- Agencement plus souple
- Plus économique

Censé

- Faciliter la communication
- Favoriser le travail en équipe
- Estomper les liens hiérarchiques

Mais, sources d'inconfort liées

- Au bruit,
- A la qualité de l'air, à la température
- A la promiscuité

Philippe DEFRANCE, Nuisances sonores dans les bureaux ouverts Règles de conception. Les conditions de travail, Avril 2019



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Plan de la présentation

1. Effets du bruit (Gêne et baisse de performance)
2. Descripteurs et Normes (ISO, D, F, FIN)
3. Evaluation et analyse des descripteurs
4. Analyse statistique sur plusieurs bureaux
5. Optimisation acoustique bureaux ouverts
6. Conclusion



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



1) Effets du bruit



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Enquête Suisse SECO



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'économie DFE
Secrétariat d'Etat à l'économie SECO

Lucerne University of Applied Sciences and Arts

**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik & Architektur



Etude SBiB

ENQUÊTE SUISSE DANS LES BUREAUX

Haute école de Lucerne – Technique & architecture / Centre de compétence pour la typologie et la planification en architecture (CCTP): Sibylla Amstutz, Sandra Kündig // SECO – Travail et santé: Dr. Christian Monn // Bern, Horw - Avril 2010

116 entreprises, 1230 questionnaires

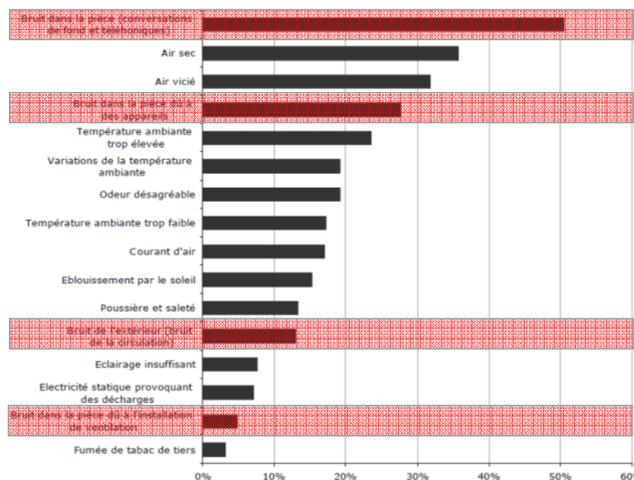


Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Enquête Suisse

■ plutôt souvent jusqu'à très souvent Gêne de l'environnement de travail



Enquête Suisse dans les Bureaux, Seco, avril 2010
Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts

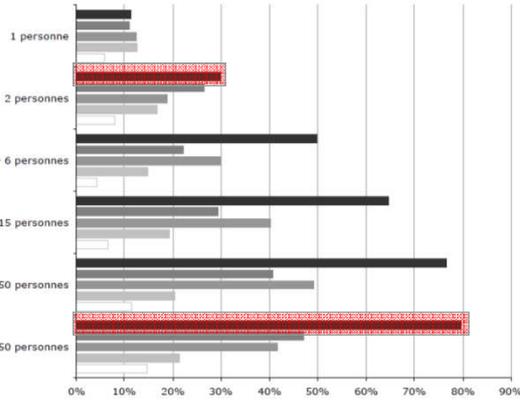


Enquête Suisse

■ Bruit dans la pièce (conversations de fond et téléphoniques)

■ Bruit dans la pièce dû à des appareils
■ Air vicié
■ Courant d'air
■ Eclairage insuffisant

Gêne sonore suivant la taille du bureau



Enquête Suisse dans les Bureaux, Seco, avril 2010

Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Enquête France INRS NF S 31-199 annexe C

QUESTIONNAIRE GABO 2014

L'ENVIRONNEMENT SONORE DE VOTRE ESPACE DE TRAVAIL

D'une façon générale, vous diriez que le niveau de bruit de votre environnement de travail est élevé :

pas du tout 2 3 4 tout à fait

D'une façon générale, vous diriez que le bruit de votre environnement de travail est gênant :

pas du tout 2 3 4 tout à fait

A votre poste de travail, vous entendez le bruit du fonctionnement des machines (ventilation, ordinateur, imprimantes...)

jamais 2 3 4 en permanence

Si réponse = "jamais" passer au bloc de questions suivant

Vous diriez que ce bruit est gênant :

pas du tout 2 3 4 tout à fait

Si réponse = "pas du tout" passer au bloc de questions suivant

Y a-t-il une activité dans votre travail pour laquelle ce bruit vous semble plus gênant ?

oui non

Si "oui" laquelle ? (Lecture, rédaction, saisie, conversations téléphoniques...)



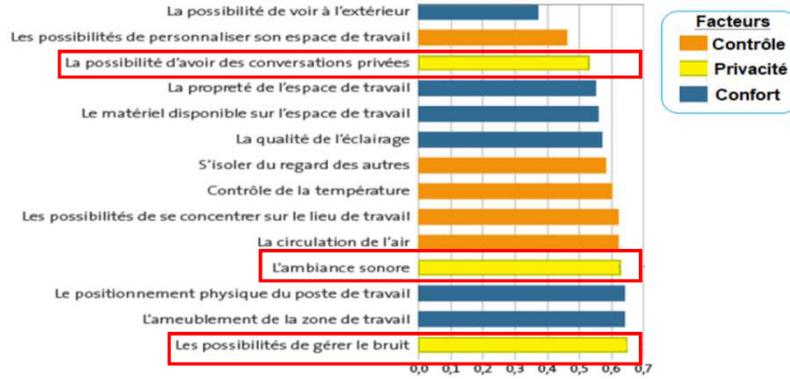
Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Enquête France

Enquête (questionnaire GABO) 2014, 27 bureaux ouverts 5 à 200 positions, 627 salariés

Corrélation des facteurs avec la satisfaction au travail



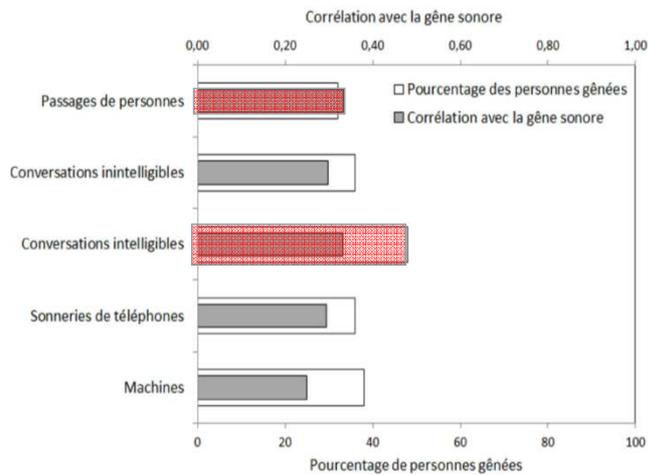
Patrick Chevret, *Le bruit dans les open-spaces : acoustique et perception*, Note scientifique et technique INRS, NS 352, 2017



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Enquête France



Patrick Chevret, *Le bruit dans les open-spaces : acoustique et perception*, Note scientifique et technique INRS, NS 352, 2017

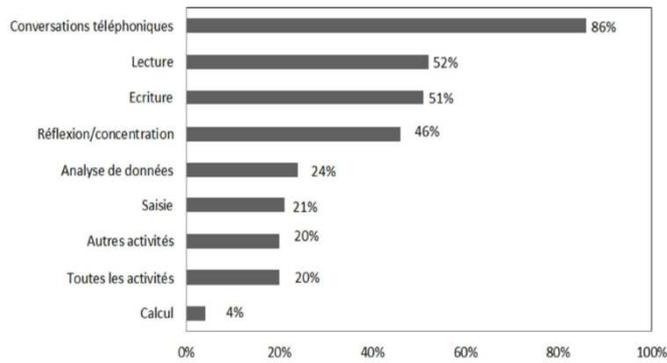
Contribution des sources de bruit à la gêne perçue par les salariés (enquête INRS 2014)



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Enquête France



Gêne sonore ressentie lors de la réalisation d'une tâche (enquête INRS 2014)

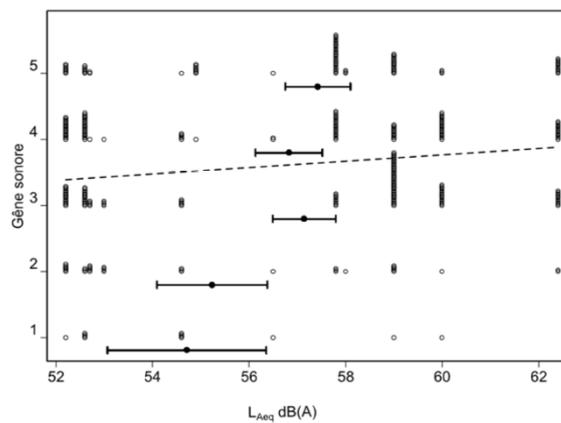
Patrick Chevret, *Le bruit dans les open-spaces : acoustique et perception*, Note scientifique et technique INRS, NS 352, 2017



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Enquête France



Patrick Chevret, *Le bruit dans les open-spaces : acoustique et perception*, Note scientifique et technique INRS, NS 352, 2017

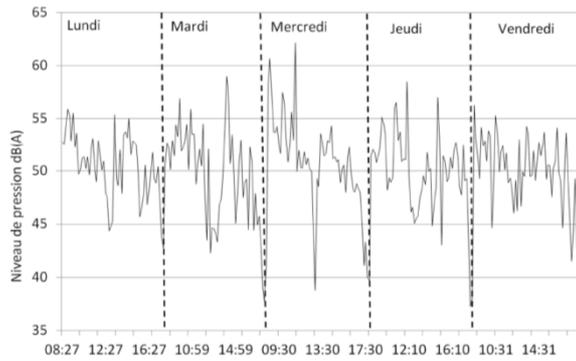
La corrélation entre les niveaux et la gêne sonore est très faible ($R^2 = 0,16$)
 les personnes se disent significativement plus gênées pour des niveaux de bruit supérieurs à 56 dB(A)



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Enquête France



Mesure du niveau de bruit ambiant dans un open-space de type administratif pendant une semaine complète

Patrick Chevret, Le bruit dans les open-spaces : acoustique et perception, Note scientifique et technique INRS, NS 352, 2017



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Enquête France

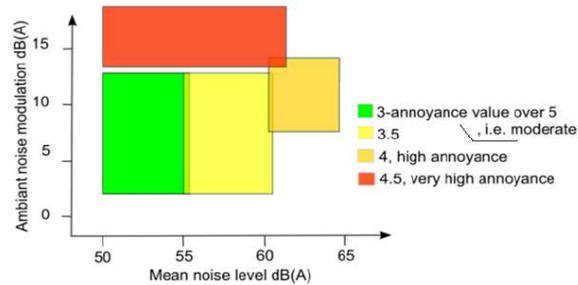


Figure 8 : Représentation de la gêne ressentie par les salariés en fonction du niveau moyen de bruit ambiant et de sa modulation.

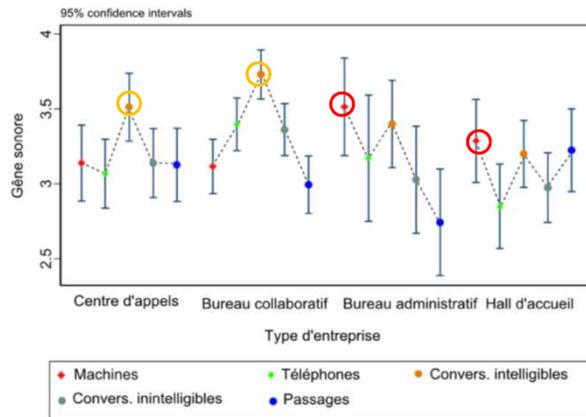
Y. Le Muet, P- Chevret, Les dessous de la norme NF S 31-199 sur les bureaux ouverts, Congrès Français d'Acoustique, CFA 2016, Le Mans



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Enquête France



Perception de la gêne sonore en fonction du type de source et d'open-space (enquête INRS 2014)

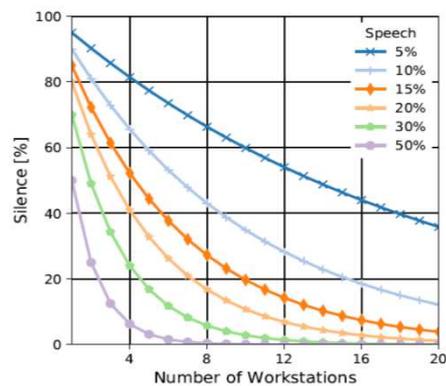
Patrick Chevret, Le bruit dans les open-spaces : acoustique et perception, Note scientifique et technique INRS, NS 352, 2017



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Absence de silence



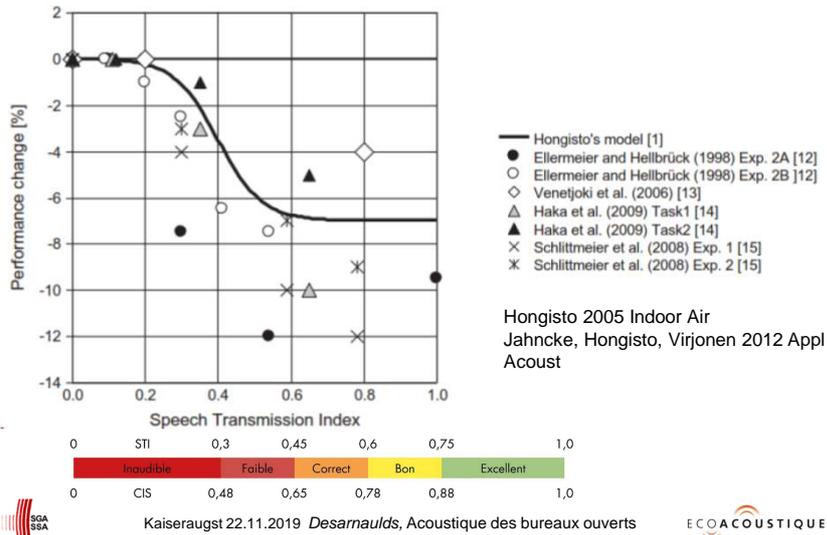
A. Dickschen et al., Evaluating room acoustic quality in open-plan offices by adding the distribution of possible source and receiver positions to the simulation, Euronoise 2018 Crete



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Baisse de performance



Synthèse des effets du bruit

- Les occupants des bureaux ouverts sont affectés par les activités environnantes
- De mauvaises conditions acoustiques provoquent de l'inattention et un manque de confidentialité des conversations
- L'inattention diminue les capacités de concentration et réduit la productivité, en particulier pour les tâches qui nécessitent des capacités cognitives
- Le bruit entraîne fatigue et stress, ainsi qu'une baisse de la satisfaction au travail

Introduction ISO 3382-3



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



2) Descripteurs et Normes

La qualité acoustique d'un plateau de bureau ouvert ne peut pas être uniquement déterminée sur le critère du temps de réverbération comme pour la plupart des autres salles.

Pour ces espaces, il est nécessaire de prendre en compte d'autres paramètres de caractérisation acoustique, définis dans la norme ISO 3382-3 relative aux mesurages des paramètres acoustiques des salles pour les bureaux ouverts.

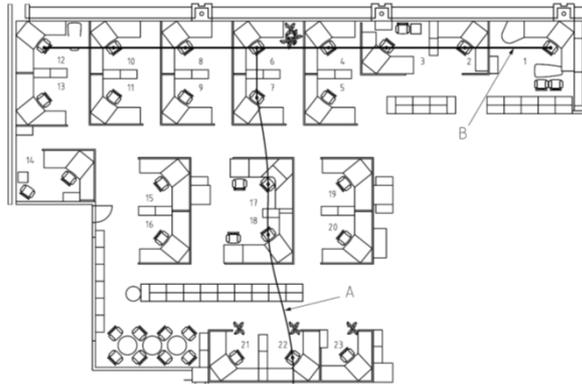


Critères ISO 3382-3

- Le r_D [m], correspondant à la **distance de distraction**, soit la distance à partir de laquelle le critère d'intelligibilité STI (Speech Transmission Index) passe sous la valeur de 0.5.
- Le $D_{2,S}$ [dB], correspondant à l'**atténuation du niveau sonore par doublement de distance**.
- Le $L_{p,A,S,4m}$ [dB(A)], correspondant au **niveau sonore mesuré à 4 mètres** d'une source omnidirectionnelle avec un niveau d'émission défini à 57.4 dB(A) à 1 mètre
- Le $L_{p,A,B}$ [dB(A)], correspondant au **niveau de bruit de fond** aux différents points de mesurage dans le local (sans le personnel)



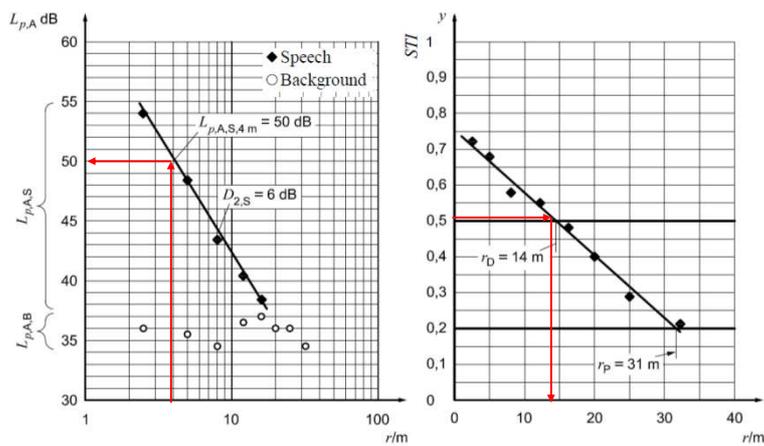
Trajectoires selon ISO 3382-3



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Evaluation descripteurs ISO 3382



a) Détermination de $D_{2,S}$ et $L_{p,A,S,4m}$

b) Détermination de la distance de distraction, r_D



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Comparaison des normes

Parameter	FRENCH – NFS 31 199: 2016			GERMAN – VDI 2569: 2016			FINNISH – RIL 243-3:2008			
	Type 1	Type 2	Type 3	Class A	Class B	Class C	Class A	Class B	Class C	Class D
D _{2,s}	> 7	> 9	> 7	≥ 8	≥ 6	4-6	> 11	9-11	7-9	< 7
D _n	≥ 6	≥ 4	≥ 6	-	-	-	-	-	-	-
RT	< 0.6	< 0.6	< 0.6	≤ 0.6	≤ 0.7	≤ 0.9	-	-	-	-
RT _{125 Hz}	< 0.8	< 0.8	< 0.8	≤ 0.8	≤ 0.9	≤ 1.1	-	-	-	-
L _{Aeq}	48-52	45-50	40-45	-	-	-	-	-	-	-
L _{bkg}	-	-	-	≤ 35	≤ 40	≤ 40	-	-	-	-
L _{p,A,5,4m}	-	-	-	≤ 47	≤ 49	≤ 51	< 48	48-51	51-54	> 54
r _d	-	-	-	-	-	-	< 5	5-8	8-11	> 11

Critère	Bonnes conditions	Conditions standards	Conditions médiocres
r ₀ (m)	≤ 5 m	Entre 5.1 et 10 m	> 10 m
D _{2,s} (dB)	≥ 7 dB	Entre 5 et 6.9 dB	< 5 dB
L _{p,A,5,4m} (dB)	≤ 48 dB	Entre 48.1 et 50 dB	> 50 dB

ISO 3382-3
Annexe A



Felix Larrieu and Jack Harvie-Clark, *CONTRASTING OPEN PLAN OFFICE DESIGN IMPLICATIONS FROM EMERGING FRENCH, GERMAN AND FINNISH STANDARDS*, ICSV24, 2017 London

Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Normes - Synthèse

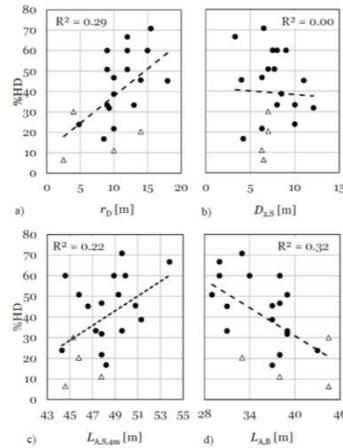
- ISO 3382-3 (2012) Mesurage des paramètres acoustiques des salles — Partie 3: Bureaux ouverts. *Descripteurs et mesurages, En cours de révision*
- France NF S 31-199 (2016) Acoustique - Performances acoustiques des espaces ouverts de bureaux. *Approche empirique (questionnaires + recommandations par type)*
- Allemagne VDI 2569, *vient juste de paraître (assez compliquée, pas rD comme France)*
- Finlande, *exigeante, basé sur version initiale de ISO 3382-3*
- ISO DIS 22955 *Qualité acoustique des espaces ouverts des bureaux (Recommandations, en complément à ISO 3382-3)*



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



3) Evaluation des descripteurs



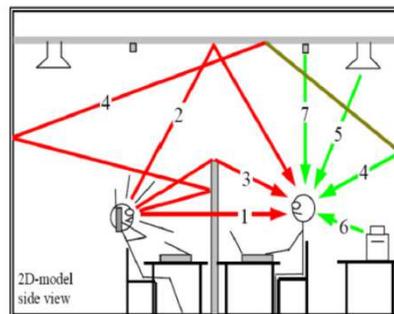
Haapakangas A, Hongisto V, Eerola M, Kuusisto T, Distraction distance and disturbance by noise – An analysis of 21 open-plan offices, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(1) 2017 127-136



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Analyse des contributions



Data for predicting speech level L_S :

- ceiling abs. coefficient
- wall abs. coefficient
- screen height and width
- ceiling height
- distances
- masking level (5+7)
- early decay time T_{10}

Direct speech (1-3), reverberant speech (4), masking sound (5-7).

1/1-oct. 125 - 8000 Hz

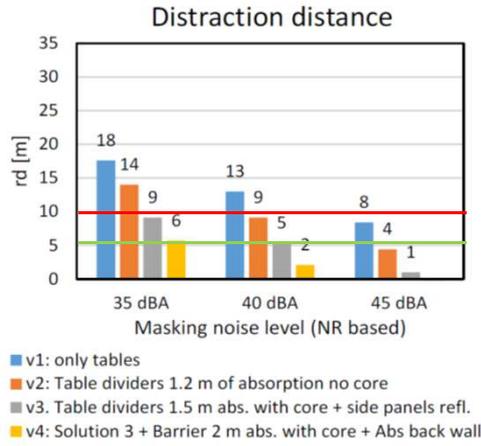
Virjonen P, Keränen J, Helenius R, Hakala J, Hongisto V, Speech privacy between neighboring workstations in an open office - a laboratory study, *Acta Acustica united with Acustica* 93 2007 771-782.



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Mesurages comparatifs



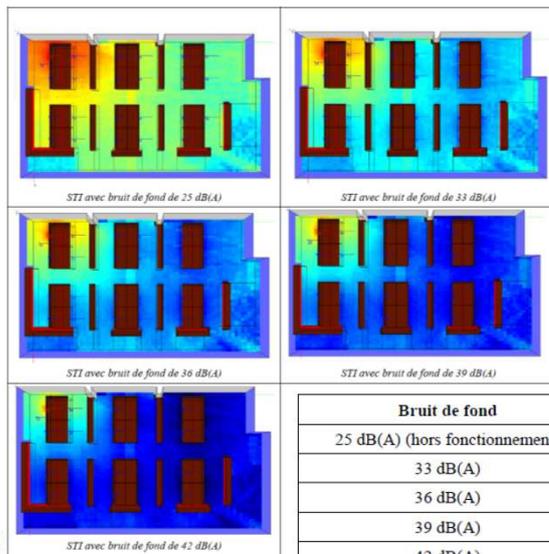
Remy WENMAEKERS; Nicole VAN HOUT, How ISO 3382-3 acoustic parameter values are affected by furniture, barriers and sound absorption in a typical open plan office, PROCEEDINGS of the 23rd International Congress on Acoustics 9 to 13 September 2019 in Aachen



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Effet du bruit de fond



Bruit de fond	Rayon de distraction r_D
25 dB(A) (hors fonctionnement)	$12,4 \pm 0,6$ m
33 dB(A)	$9,7 \pm 0,6$ m
36 dB(A)	$8,2 \pm 0,6$ m
39 dB(A)	$6,6 \pm 0,6$ m
42 dB(A)	$4,7 \pm 0,6$ m



Figure 15 : Cartographie de l'intelligibilité de

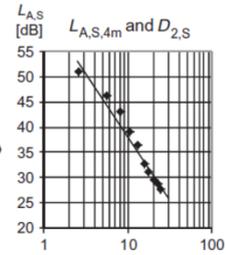
Tableau 9 : Rayons de distraction obtenus en fonction du niveau de bruit de fond.

Calcul analytique

	$D_{2,S}$	$L_{A,S,4m}$
T_{20}	0.11	0.14
T_E	0.01	0.00
L	0.15	0.02
W	0.01	0.05
H	0.07	0.00
h	0.29	0.33
α_c	0.26	0.26
α_{floor}	0.00	0.00
α_{screen}	0.21	0.05
α_{left}	0.15	0.15
α_{right}	0.11	0.19
α_f	0.25	0.19
h/H	0.60	0.32
$H-h$	0.40	0.11
L/H	0.25	0.01
V	0.02	0.01

ROOM VARIABLES

- room length
- room width
- room height
- screen height
- ceiling absorption
- furnishing absorption
- speech effort



$$D_{2,S} = 8 \frac{h}{H} + 0.16 \frac{L}{H} + 4\alpha_c + 1.7\alpha_f$$

$$L_{A,S,4m} = L_{A,S,1m} - 3h - 0.1W - 4.6\alpha_c - 0.8\alpha_f$$

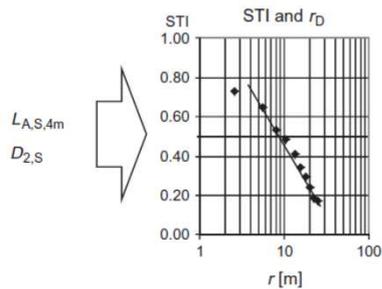
J. Keränen, V. Hongisto, Prediction of the spatial decay of speech in open-plan offices, Applied Acoustics 74 (2013) 1315–1325



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Calcul analytique



$$m(F_i, f_j) = \frac{1}{\sqrt{1 + [2\pi F_i T_E(f_j)/13.8]^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-L_{SN}(r, f_j)/10}}$$

$$SN_{\text{app}}(F_i, f_j) = 10 \lg \frac{m(F_i, f_j)}{1 - m(F_i, f_j)}$$

$$STI = \frac{15 + \sum_{j=1}^7 k_j \left(\frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} SN_{\text{app}}(F_i, f_j) \right)}{30}$$

$$L_{A,S}(r) = L_{A,S,4m} - 3.3D_{2,S}[\lg(r) - \lg(4)]$$

J. Keränen, V. Hongisto, Prediction of the spatial decay of speech in open-plan offices, Applied Acoustics 74 (2013) 1315–1325



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Calcul analytique simplifié

$$r_D = 10^{0.3 \left(\frac{L_{A,S,4m} - L_{p,A,B} - SNR_D}{-D_{2,s}} \right) + 0.6}$$

$$SNR_D = -10 \lg \left[\frac{m_{avg,rev}}{0.5} - 1 \right]$$

Pour chaque bureau ou valeur fixe $SNR_D = 3.7$ dB (EcoAcoustique 5.1 dB)

$$m_{avg,rev} = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} \frac{1}{\sqrt{1 + [2\pi F_i EDT / 13.8]^2}}$$

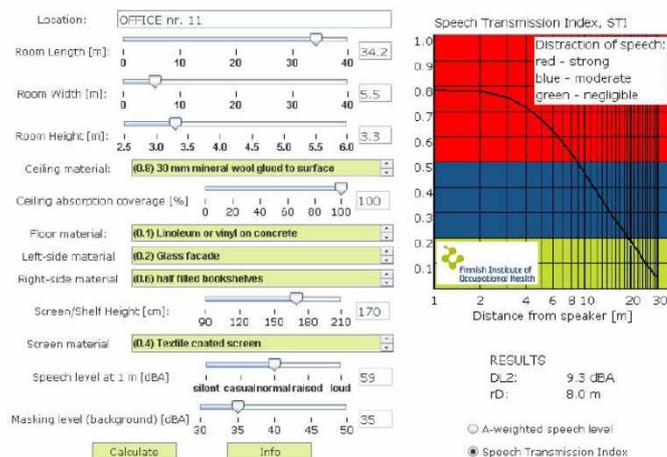
Remy Wenmaekers, Constant Hak, Spatial decay rate of speech in open plan offices: the use of D2,S and Lp,A,S,4m as building requirements, Proc Euronoise 2015, Maastricht



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Calcul analytique



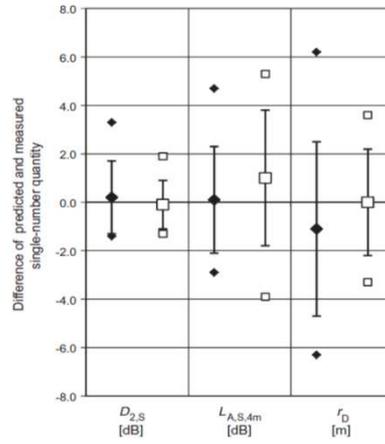
J. Keränen, P. Virjonen, V. Hongisto, A New model for acoustic design of open offices, Proc ICA 2007 Madrid



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Calcul analytique



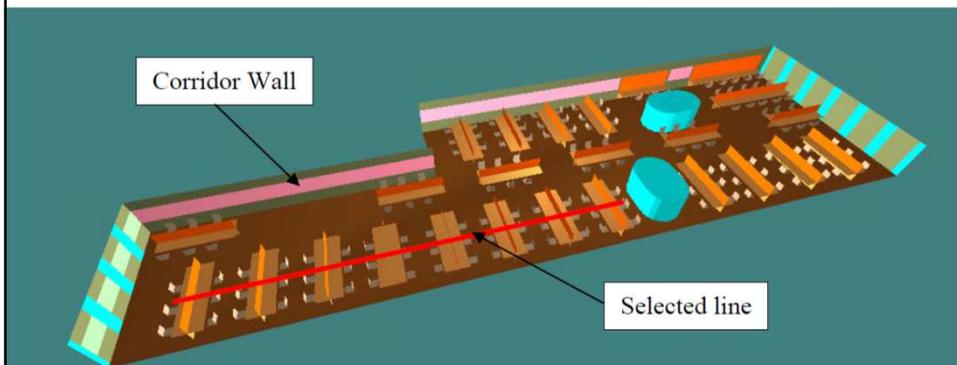
J. Keränen, V. Hongisto, Prediction of the spatial decay of speech in open-plan offices, *Applied Acoustics* 74 (2013) 1315–1325



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Simulations



Felix Larrieu and Jack Harvie-Clark, CONTRASTING OPEN PLAN OFFICE DESIGN IMPLICATIONS FROM EMERGING FRENCH, GERMAN AND FINNISH STANDARDS, ICSV24, 2017 London



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Simulations

Element	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Ceiling	Class A			
Floor	Carpet			
Wall panels	No		Corridor wall	
Screen height / m	1.1	1.3	1.5	1.8
Side Screen	No			Yes
Absorbent screens	No		Class B	Class A
Masking sound, dB(A)	35			

Parameter	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
$L_{p,A,S,4m}$ / dB	48	46	43	42
$D_{2,S}$ / dB	4.4	5.7	7.1	9.2
T_{125Hz} / s	1	0.9	0.8	0.7
$T_{0.5-2k}$ / s	0.7	0.6	0.4	0.3
$r_{0.5-2k}$ / m	8	6	5-6	5
Finnish Class	D, "Poor"	D, "Poor"	C, "Fair"	B, "Good"
German Class	C	C-B	B	A
French Type	None	None	1 & 3	1, 2 & 3

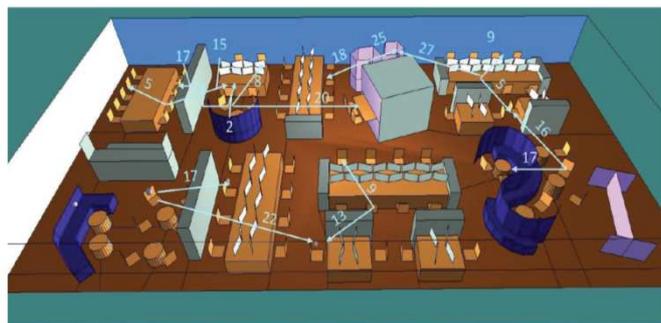
Felix Larrieu and Jack Harvie-Clark, CONTRASTING OPEN PLAN OFFICE DESIGN IMPLICATIONS FROM EMERGING FRENCH, GERMAN AND FINNISH STANDARDS, ICSV24, 2017 London



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Simulations



$$D_{n,A,S} = L_{S,A} - SNR - L_b$$

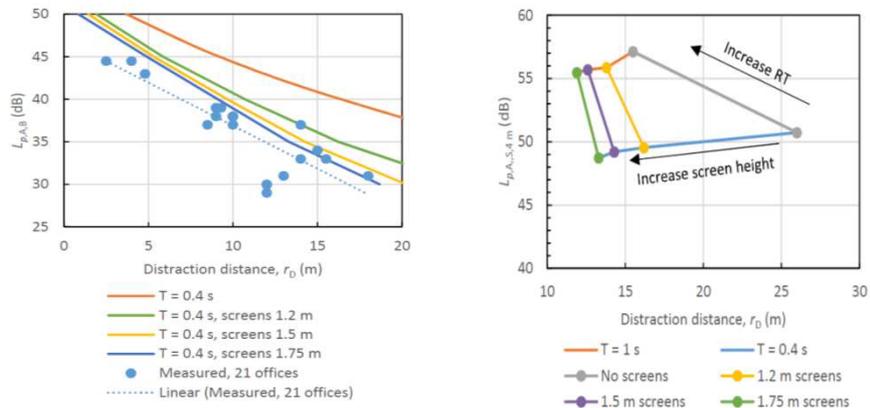
J. HARVIE-CLARK; F. LARRIEU; C. OPSANGER, ISO 3382-3: NECESSARY BUT NOT SUFFICIENT A NEW APPROACH TO ACOUSTIC DESIGN FOR ACTIVITY-BASED WORKING OFFICES, PROCEEDINGS of the 23rd International Congress on Acoustics 9 to 13 September 2019 in Aachen



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Simulations



Selon simulations, une augmentation de 1 dB(A) du bruit de fond entraîne ainsi une diminution favorable de 1 m de la distance de distraction.

Jens Holger Rindel, Open plan office acoustics – a multidimensional optimization problem. Proc. DAGA 2018, 19-22 March 2018, Munich



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



4) Analyse statistique

Base de données EcoAcoustique sur 22 bureaux ouverts

	r_D [m]	$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	$D_{2,s}$ [dB]	$L_{p,A,B}$ [dB]	T_r [s]
Min.	6.5	39.7	4.1	26	0.25
Mean	10.8	47.9	6.4	32.8	0.46
Max	16	56.5	11.8	40.7	0.63



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Corrélation entre descripteurs

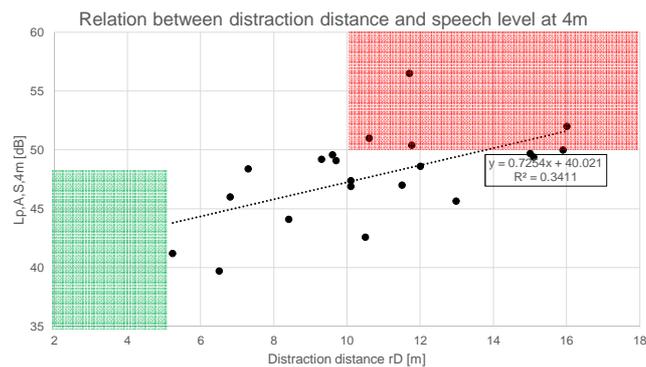
Coefficient de détermination	r_D [m]	$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	$D_{2,s}$ [dB]	$L_{p,A,B}$ [dB]	T_r [s]
r_D [m]	-				
$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	0.34	-			
$D_{2,s}$ [dB]	0.00	0.00	-		
$L_{p,A,B}$ [dB]	0.10	0.01	0.06	-	
T_r [s]	0.02	0.04	0.22	0.06	-



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Corrélation entre descripteurs



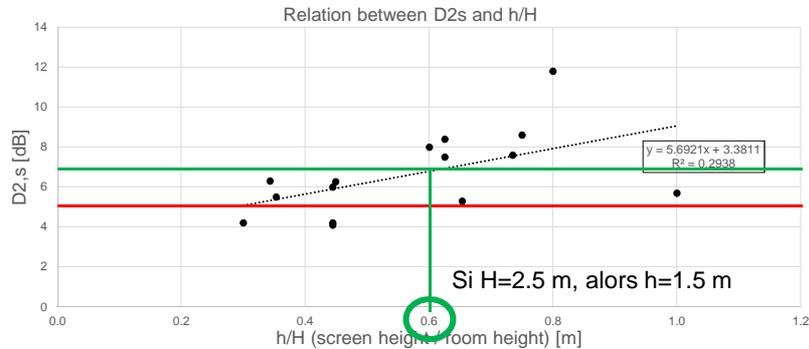
Coefficient de détermination	r_D [m]	$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	$D_{2,s}$ [dB]	$L_{p,A,B}$ [dB]	T_r [s]
r_D [m]	-				
$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	0.34	-			
$D_{2,s}$ [dB]	0.00	0.00	-		
$L_{p,A,B}$ [dB]	0.10	0.01	0.06	-	
T_r [s]	0.02	0.04	0.22	0.06	-



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Corrélation entre descripteurs et paramètres



Coefficient de détermination	r_D [m]	$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	$D_{2,s}$ [dB]	T_r [s]
L	0.08	0.00	0.06	0.10
W	0.07	0.08	0.06	0.00
H	0.19	0.00	0.03	0.27
h (screen)	0.06	0.17	0.25	0.44
α_c (ceiling)	0.05	0.15	0.01	0.17
Density [p/100m ²]	0.05	0.07	0.02	0.01
h/H	0.00	0.13	0.29	0.64



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Autres bases de données

- **Virjonen P, Keränen J, Hongisto V.** Determination of acoustical conditions in open-plan offices: proposal for new measurement method and target values. *Acta Acust. u/w Acustica*. 2009 Mar 1;95(2):279-90.
- **Keränen J, Hongisto V.** Prediction of the spatial decay of speech in open-plan offices. *Applied Acoustics*. 2013 Dec 1;74(12):1315-25.
- **Yadav M, Cabrera D, Love J, Kim J, Holmes J, Caldwell H, de Dear R.** Reliability and repeatability of ISO 3382-3 metrics based on repeated acoustic measurements in open-plan offices. *Applied Acoustics*. 2019 Jul 1;150:138-46.
- **Selzer J, Schelle F.** Practical aspects of measuring acoustics in German open plan offices. In 11th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Euronoise) 2018
- **Haapakangas A, Hongisto V, Eerola M, Kuusisto T.** Distraction distance and perceived disturbance by noise—An analysis of 21 open-plan offices. *JASA* 2017 Jan 12;141(1):127-36.



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Autres bases de données 108 bureaux

	Ecoacoustique (CH)	Virjonen/ Keränen (FIN)	Yadav (AUS)	Haapakangas (FIN)	Selzer (DE)
Nombre bureaux	22	25	27	21	13
r_D [m]	X	X	X	X	X
$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	X	X	X	X	X
$D_{2,s}$ [dB]	X	X	X	X	X
$L_{p,A,B}$ [dB]	X	X	X	X	
T_r [s]	X	X	X		X
Dimensions	X	X	X		
Info écran	X	X	X		
Info absorption	X	X	(X)		
Densité	X	X	X		



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Moyenne des descripteurs

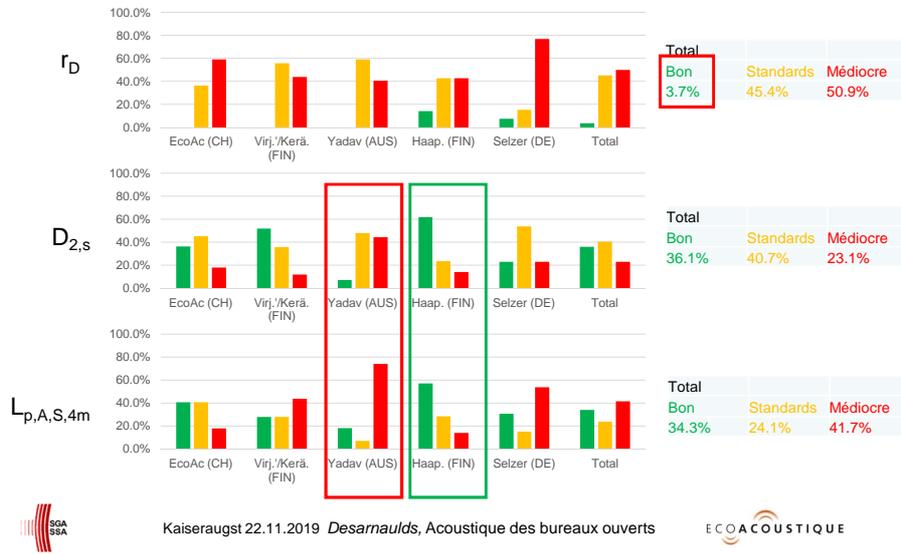
Moyennes	Ecoacoustique (CH)	Virjonen/ Keränen (FIN)	Yadav (AUS)	Haapakangas (FIN)	Selzer (DE)	Total
r_D [m]	10.8	10.5	9.9	10.6	12.1	10.6
$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	47.9	49.7	51.5	48.0	49.7	49.4
$D_{2,s}$ [dB]	6.4	8	5.1	7.4	5.8	6.6
$L_{p,A,B}$ [dB]	32.8	35.9	42.9	36.3	-	37.3
T_r [s]	0.46	0.54	0.50	-	0.45	0.48



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Performance selon ISO 3382-3



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts

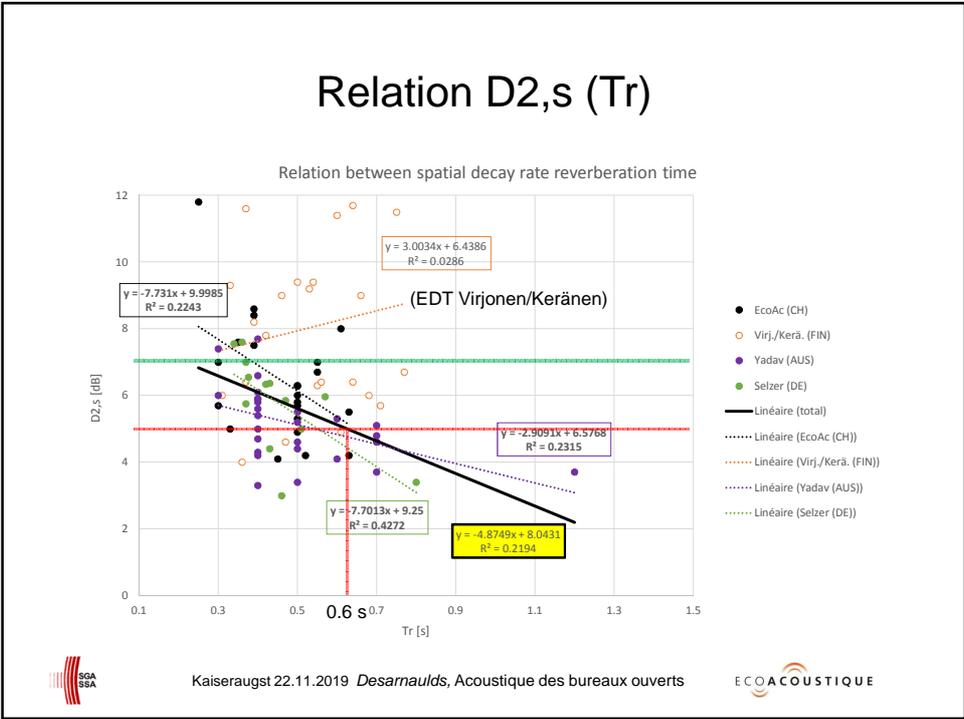
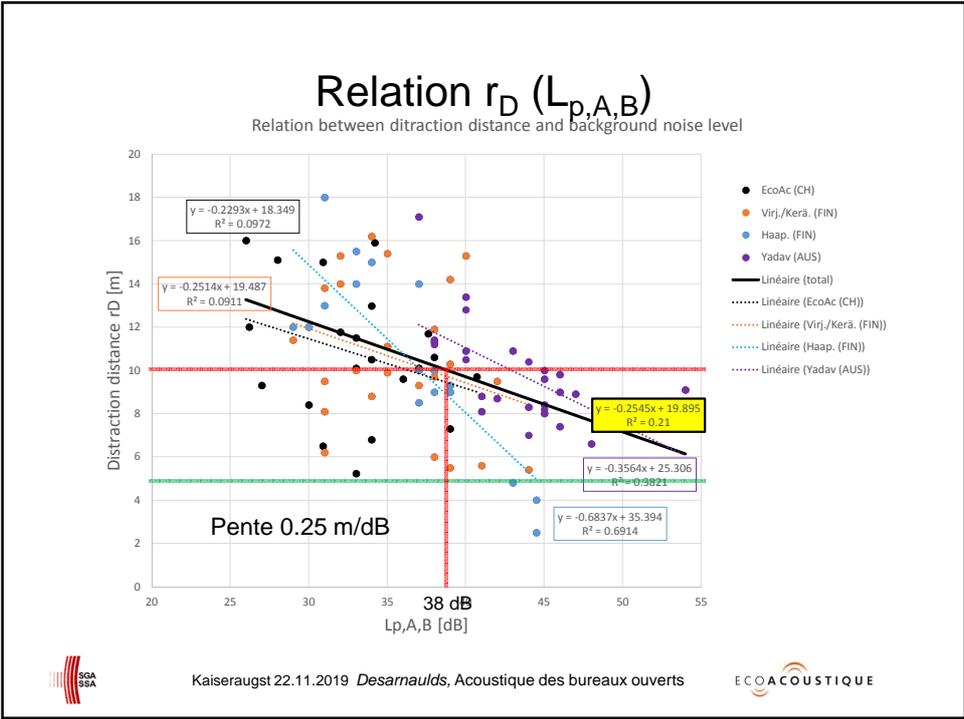
ECOACOUSTIQUE

Corrélation entre descripteurs

Coefficient de détermination	r_D [m]	$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	$D_{2,s}$ [dB]
r_D [m]	-		
$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	0.03	-	
$D_{2,s}$ [dB]	0.01	0.11	-
$L_{p,A,B}$ [dB]	0.21	0.15	0.15
T_r [s]	0.01	0.02	0.22

Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts

ECOACOUSTIQUE



Corrélation entre descripteurs et paramètres

Coefficient de détermination	r_D [m]	$L_{p,A,S,4m}$ [dB]	$D_{2,s}$ [dB]	Tr [s]
L	0.00	0.05	0.13	0.12
W	0.03	0.01	0.00	0.04
H	0.03	0.02	0.02	0.15
h (screen)	0.15	0.12	0.19	0.01
α_c (ceiling)	0.16	0.02	0.05	0.19
Density [p/100m2]	0.00	0.00	0.00	0.03



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts

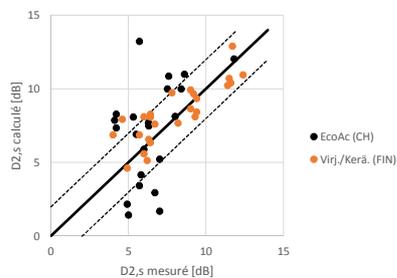


Modèles analytiques existant pour $D_{2,s}$ et $L_{A,S,4m}$

J. Keränen, V. Hongisto, Prediction of the spatial decay of speech in open-plan offices, Applied Acoustics 74 (2013) 1315–1325

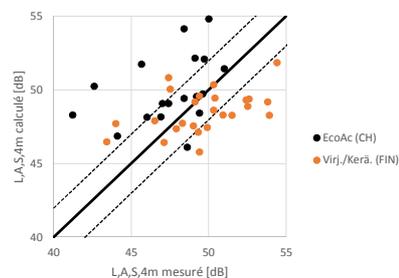
$$D_{2,s} = 8 \frac{h}{H} + 0.16 \frac{L}{H} + 4\alpha_c + 1.7\alpha_t$$

Calcul $D_{2,s}$ selon le model Keränen/Hongisto



$$L_{A,S,4m} = L_{A,S,1m} - 3h - 0.1W - 4.6\alpha_c - 0.8\alpha_t$$

Calcul du $L_{p,A,S,4m}$ selon le model Keränen/Hongisto



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Nouveau modèle analytique pour $D_{2,s}$

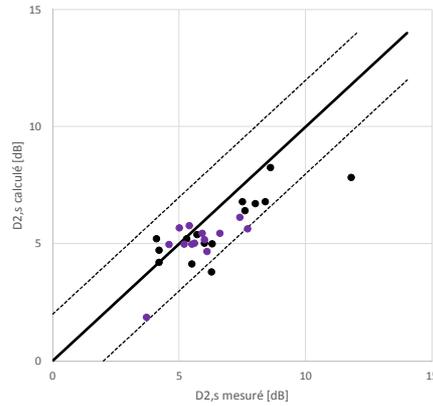
Atténuation du niveau sonore par doublement de distance en fonction des paramètres physiques

$D_{2,s}$ modèle (avec écran):

$$D_{2,s} = 14.4 - 5 * T_r - 0.5 * L - 5.5 * h + 0.4 * L * h$$

$$R^2 = 0.64$$

$$p\text{-value} = 6.6e^{-5}$$



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



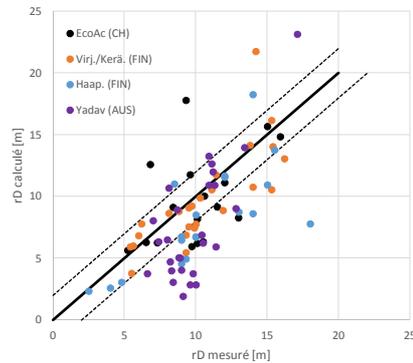
Modèle analytique existant simplifié pour r_D

$$r_D = 10^{\left(\frac{L_{p,A,B} - L_{A,S,4m} + SNR_D}{-3.3D_{2,s}} + \log(4)\right)}$$

Optimisation selon base de donnée,
 $SNR_{D,optimal} = 5.1$ dB (3.7 Wenmeakers)

Remy Wenmeakers, Constant Hak, Spatial decay rate of speech in open plan offices: the use of $D_{2,S}$ and $L_{p,A,S,4m}$ as building requirements, Proc Euronoise 2015, Maastricht

Calcul du r_D selon model Wenmeakers et paramètres mesurés



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Nouveaux modèles analytiques pour r_D

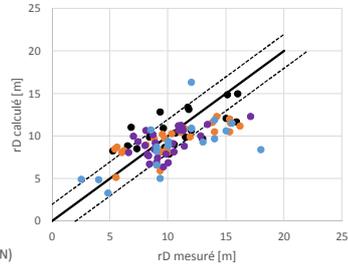
r_D modèle 1 (descripteurs) :

$$r_D = 8.8 - 0.4 * (L_{p,A,B} - L_{p,Am}) - 0.6 * D_{2,s}$$

$$R^2 = 0.484$$

$$p - \text{value} = 4.2e^{-10}$$

- EcoAc (CH)
- Virj./Kerä. (FIN)
- Yadav (AUS)
- Haap. (FIN)

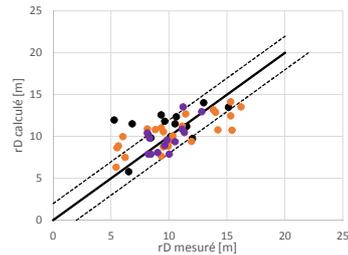


r_D modèle 2 (paramètres):

$$r_D = 31 - 0.3 * L_{p,A,B} - 3.7 * \alpha_c - 5.1 * h$$

$$R^2 = 0.424$$

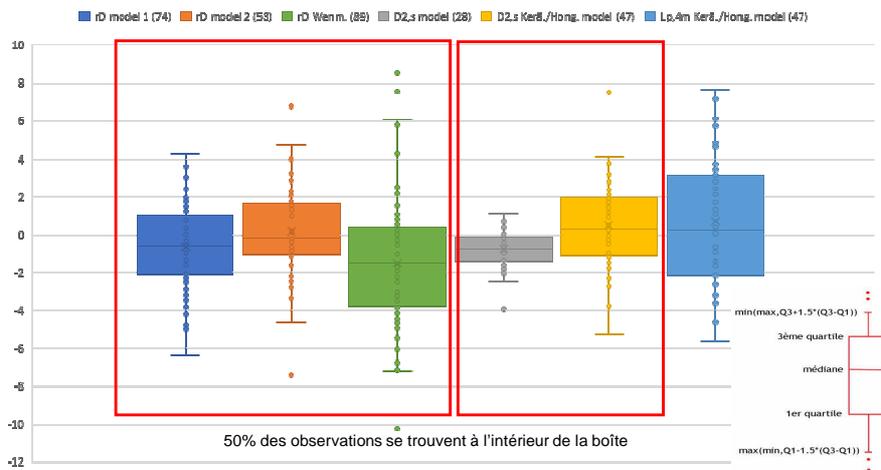
$$p - \text{value} = 5.2e^{-6}$$



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Résumé performances modèles



50% des observations se trouvent à l'intérieur de la boîte



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



5) Optimisation

The area of an open plan office shall be at least 800 m² and it should occupy at least 80 employees to produce sufficient background noise.

Guideline Finland, 1972

1. Nicht zu klein
 - Bodenfläche grösser als 400m²
grösser als 12m² pro Person
2. Möglichst grosse Schallabsorption
 - (Hallradius grösser als 3m)
 - Textiler Bodenbelag
 - Akustik - Decke (Unterzüge, Kassettierung)
 - Schallabsorbierende Wände
3. Parallele reflektierende Wandflächen vermeiden
 - Unregelmässige Grund- und Aufrisse
(Schragstellung der Wände)
4. Gleichgewicht zwischen mittlerem Geräuschpegel und den Schallspitzen
 - Mittlerer Geräuschpegel 45-55 dB(A)
 - Pegelspitzen max. 10-20 dB(A) über dem mittleren Geräuschpegel
5. Geschickte Unterteilung der Arbeitsfläche
 - Laute und leise Arbeitsvorgänge trennen
 - Abschirmung durch Büromöbel und kleinere, bewegliche Wände

Anselm Lauber, Raumakustik, ETHZ, 1981



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Types d'optimisation

1. Traitement acoustique de la salle
2. Organisation, layout et gestion des flux
2. Mobiliers (écrans)
4. Système communication
5. Masquage
6. Conditions d'utilisation



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Traitement acoustique

- Revêtir les surfaces d'un matériau acoustiquement absorbant pour limiter le temps de réverbération
- Traiter le plafond en priorité (classe A, $\alpha_w \geq 0,9$) éventuellement par des baffles (si dalle active, pose perpendiculaire à l'axe des bureaux pour limiter la propagation)
- Si besoin, traiter les murs (panneaux, rideaux)
- Recouvrir le sol d'un matériau souple (moquette, év. PVC) pour réduire les bruits de chocs



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Layout

- 10 m²/personne (10 personnes/100 m²), si possible
12 m²/personne (8 personnes/100 m²)
- Suffisamment de salles de support et replis (phonebooth, réunions), soit 1 à 3 salles par 15 postes selon NF S 31-199
- Les positionner pour structurer l'espace ouvert (écrans) et limiter les déplacements



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Layout et flux

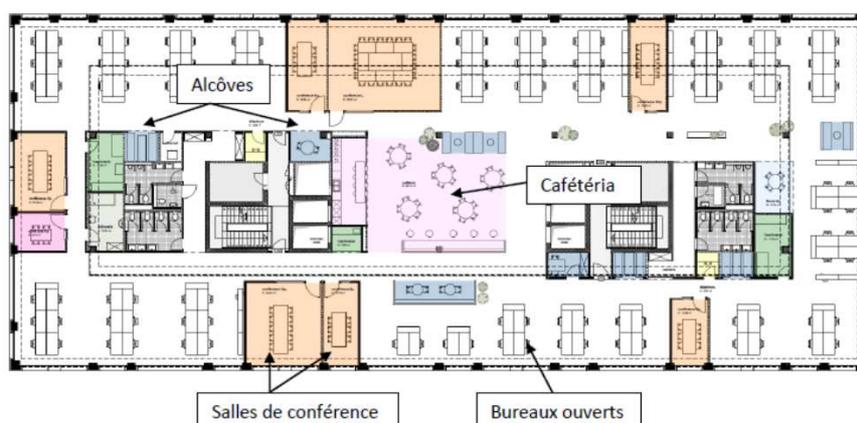
- Regrouper les postes collaborant (par équipes, projets)
- Séparer les services, équipes (non collaborant)
- Isoler les espaces et équipements bruyants (pauses, réunion, imprimantes, etc.)
- Séparer les espaces de travail des flux de déplacement (délimiter visuellement les zones de circulation, éviter les formes en couloir)



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



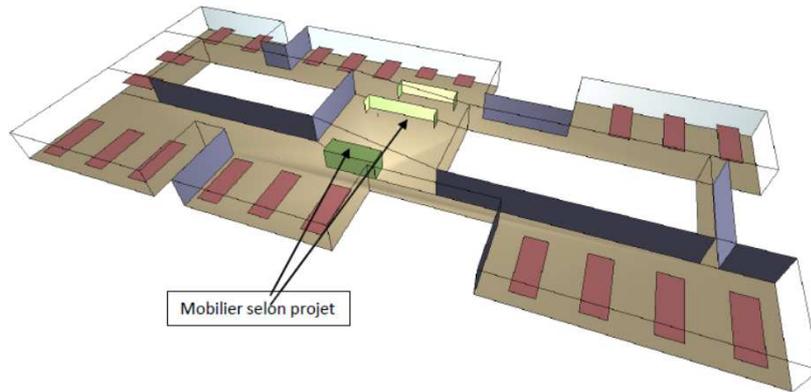
Bruit ambiant et typologie



Le revêtement de sol est prévu en moquette (silencieux à la marche et absorbant haute fréquence) et le plafond est prévu en métal perforé avec un coefficient d'absorption moyen $\alpha_w \geq 0.80$.



Exemple projet - modélisation

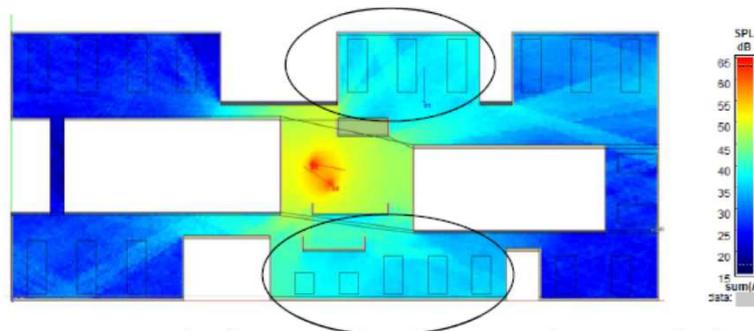


Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Exemple projet – Simulation

Bruit de conversation dans la cafétéria



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Mobiliers



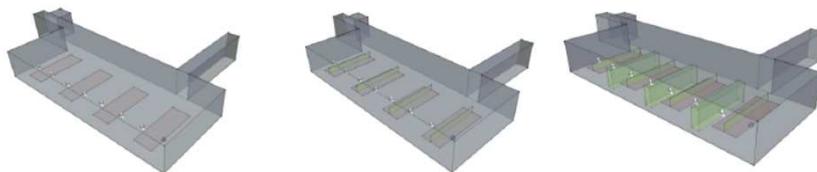
- Prévoir des séparateurs entre les postes (cloisonnettes, écrans, armoires)
- Ecrans hauts entre groupes de travail (>1.7 m)
- Ecrans entre postes de travail (>1.5 m partie, éventuellement translucide partie supérieure)
- Ecrans absorbants (plutôt que réfléchissants) et isolants (âme pleine)
- Fermeture partielle latérale (côté circulation)
- Panneaux ou voilages absorbants devant les vitrages ou cloison ($\alpha_w > 0.60$)



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Simulations effet des écrans

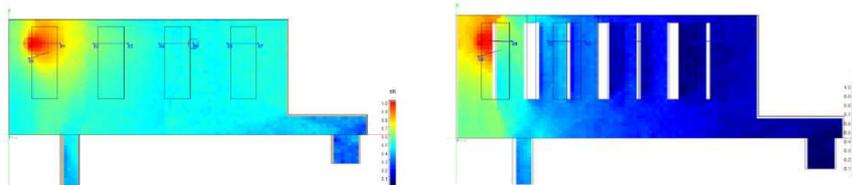


Configuration 1

Configuration 2

Configuration 3

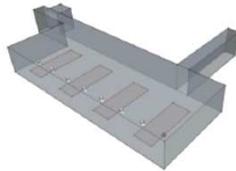
Simulation intelligibilité configuration 1 et 3



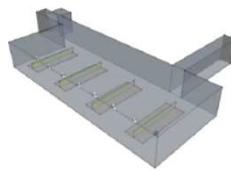
Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



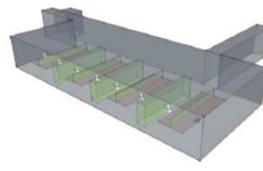
Simulations effet des écrans



Configuration 1



Configuration 2



Configuration 3

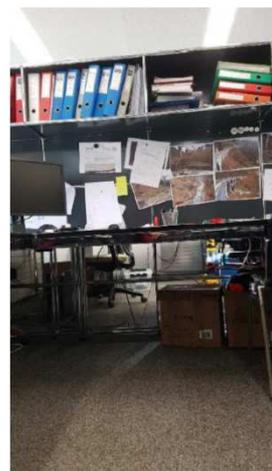
	Configuration 1	Configuration 2	Configuration 3
r_D (m)	> 15 m	8 +/- 1 m	< 5 m
$DL_{z,s}$ (dB)	2.4 dB	3 dB	5 dB
$L_{p,A,5,4m}$ (dB)	50.6 dB(A)	46 dB(A)	43 dB



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



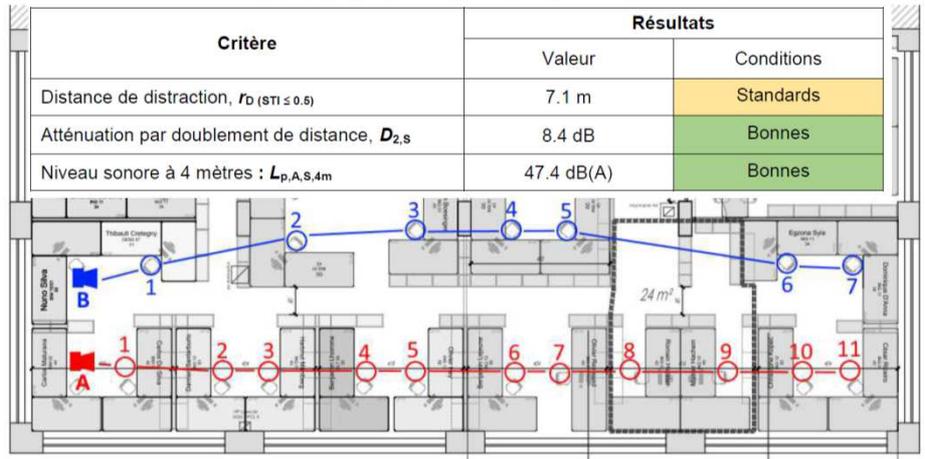
Mesurages avec écrans hauts



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Exemple avec écrans hauts



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Effet de la hauteur de l'écran

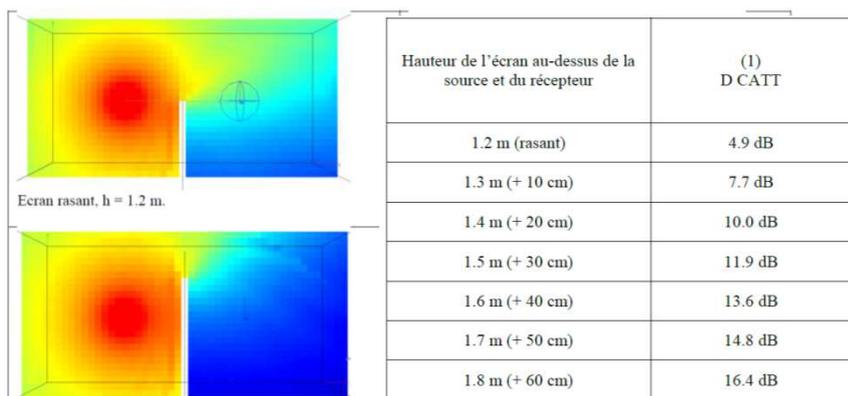


Tableau 6 : Atténuation obtenue à 1 KHz

Figure 10 : Cartographie du niveau sonore à 1 KHz avec variation de la hauteur de l'écran.



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Effet de l'absorption du plafond sur la performance de l'écran

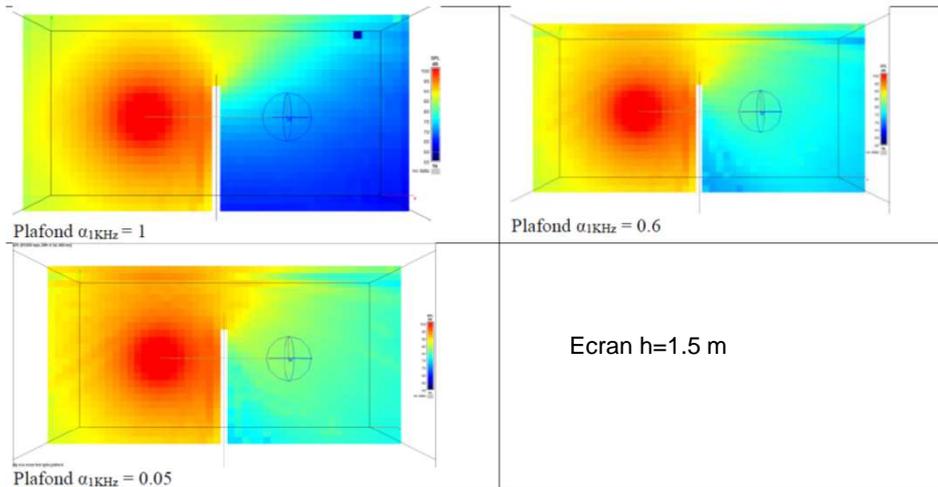


Figure 12 : Influence des performances d'absorption sur l'effet d'écran.

Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts

ECOACOUSTIQUE



Effet de l'absorption du plafond sur la performance de l'écran



Patrick Chevret, Le bruit dans les open-spaces : acoustique et perception, Note scientifique et technique INRS, NS 352, 2017



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts

ECOACOUSTIQUE

Effet de l'absorption du plafond sur la performance de l'écran

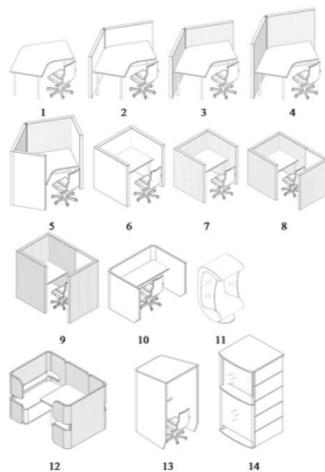
Hauteur d'écran séparateur en cm	Visibilité	Atténuation de poste à poste sans traitement absorbant (plafond plâtre) en dB	Atténuation de poste à poste avec un traitement en plafond avec Alpha w = 1 en dB
110	Satisfaisante pour 95 % de la population	1,1	3,6
120		1,7	4,5
130		2,4	5,4
140	Satisfaisante pour 5 % de la population	2,9	6,3
150	Inexistante	3,4	6,5



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Effet de l'absorption du plafond sur la performance de l'écran



Furniture	Ds [dB]	Furniture	Ds [dB]
1	0.0	8	2.6
2	0.2	9	4.0
3	0.6	10	0.8
4	1.0	11	3.9
5	1.5	12	1.9
6	0.6	13	2.8
7	1.8	14	18.5

Atténuation du mobilier mesuré **en chambre réverbérante** selon le projet de norme ISO/DIS 23351 (Measurement of speech level reduction of furniture ensembles and enclosures)



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Système communication



- Assurer la visibilité entre les postes et l'apport d'éclairage
- Mettre à disposition des équipements téléphoniques optimisant l'intelligibilité et limitant le niveau sonore (émission et immission)
- Système avec écouteur sur une oreille (système mono oreillette, meilleur pour l'audition de conversations proches) ou deux oreilles (système binaural, meilleur pour l'atténuation des conversations lointaines)



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts

ECOACOUSTIQUE

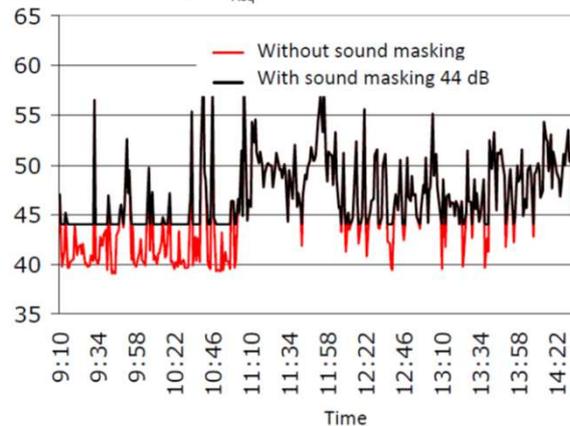
Masquage

A GUIDE TO OFFICE ACOUSTICS

HOWARD C. HARDY
Consultant in Acoustic, Chicago, Illinois

ARCHITECTURAL RECORD FEBRUARY 1957

Sound level in the office L_{Aeq} [dB]



It should be remarked that noise, when it is steady and not too high in level can be beneficial rather than harmful. A person will become so used to a steady low frequency background noise, such as outside traffic, an office fan, or ventilation noise, that he will no longer be conscious of it. This noise will tend to mask out the transient sounds such as typewriters and telephone conversations and conferences being held some distance away. For this reason, people will often complain more about the office noise when the fans are off than when they are on. If, however, the background noise becomes so high that telephone conversation and small conferences are difficult to conduct, then noise complaints will be registered again.

V. Hongisto, Room Acoustics, lecture on Noise Control in Aalto University, nov. 2018



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts

ECOACOUSTIQUE

Masquage

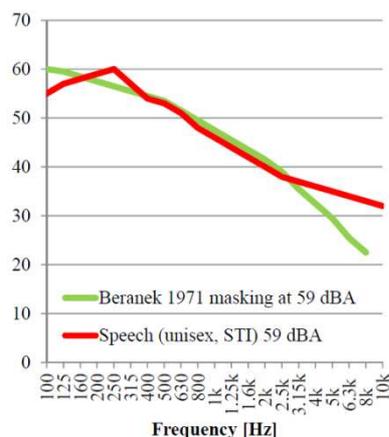
- Objectif : 41 dB(A) +/- 3 dB(A). Possibilité d'utiliser :
- Bruit des installations techniques (ventilation)
- Bruit extérieur (fenêtres ouvertes ou faiblement isolantes)
- Système de masquage (diffusion de bruit neutre continu avec des petits haut-parleurs)
 - De façon globale dans le faux-plafond ou le faux-plancher
 - De façon locale dans le mobilier (écrans, lampes) avec ou sans contrôle (HP réglable)
 - De façon personnelle, intégré aux casques



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts

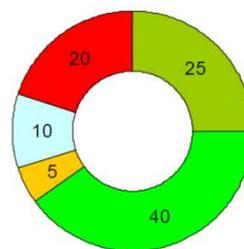


Masquage



- “There is a masking sound system in your office which produces humming sound which resembles the sound of ventilation.”
- **QUESTION:** “What do you think about this masking system?”

Share of respondents [%]



- No answer
- The sound is o.k. No disturbance.
- I cannot say.
- Other comments.
- Disturbs.

Hongisto V, Haapakangas A, Helenius R, Keränen J, Oliva D, Acoustic satisfaction in an open-plan office before and after the renovation, Euronoise 2012, June 10-13, 654-659, Prague



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Exemple masquage



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



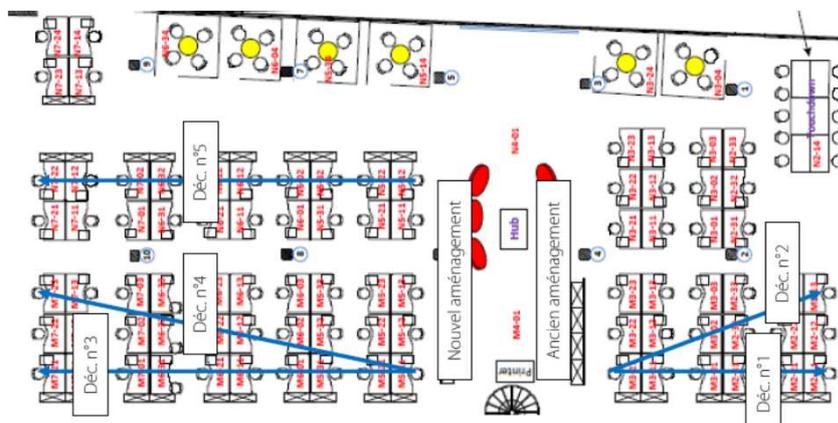
Exemple masquage



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Masquage intégré aux écrans



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Masquage intégré aux écrans

	Niveau de bruit de fond minimum	Niveau de bruit de fond maximum	Valeur moyenne (avec écart type)
Décroissance n°1, sans écrans	31.8 dB(A)	33.7 dB(A)	32.8 ± 0.8 dB(A)
Décroissance n°2, sans écrans	32.3 dB(A)	34.5 dB(A)	33.1 ± 0.9 dB(A)
Décroissance n°3, avec écrans et système de masquage partiel	32.2 dB(A)	40.2 dB(A)	36.7 ± 2.9 dB(A)
Décroissance n°4, avec écrans et système de masquage partiel	33.6 dB(A)	41.0 dB(A)	37.9 ± 3.2 dB(A)
Décroissance n°5, avec écrans et système de masquage à toutes les places	38.8 dB(A)	40.7 dB(A)	39.5 ± 0.7 dB(A)



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Masquage intégré aux écrans

Décroissance n°2 (diagonale, sans écrans)

Critère	Résultats	
	Valeur	Performance
Rayon de distraction, $r_D (STI \leq 0,5)$	10,4 m	médiocre
Atténuation par doublement de distance, $DL_{2,5}$	6,6 dB	Standard
Niveau sonore à 4 mètres : $L_{p,A,5,4m}$	49,2 dB(A)	Standard

Décroissance n°5 (longitudinale, avec écrans et masquage à toutes les places)

Critère	Résultats	
	Valeur	Performance
Rayon de distraction, $r_D (STI \leq 0,5)$	4 m	Bonne
Atténuation par doublement de distance, $DL_{2,5}$	6,9 dB	Standard
Niveau sonore à 4 mètres : $L_{p,A,5,4m}$	40,1 dB(A)	Bonne



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Charte

Annexe B de la norme NF S31-199

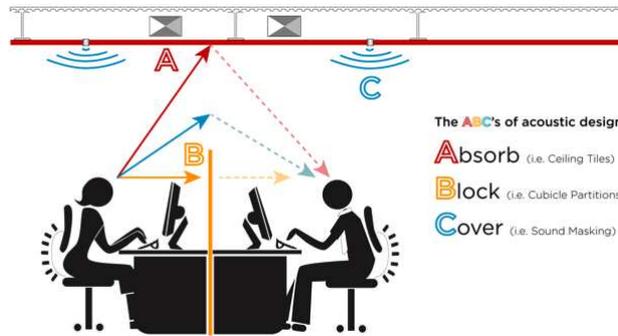
- éviter les discussions longues sur le plateau ;
- parler à voix mesurée aussi bien au téléphone qu'entre collègues ;
- éviter de communiquer en se déplaçant ;
- faire les conférences téléphoniques et les réunions dans un bureau fermé ou un espace dédié (à utiliser de façon intensive et appropriée pour toute réunion, même courte)
- éviter de discuter avec les postes éloignés, privilégier les messageries instantanées ou les espaces de réunion ;
- ajuster le niveau sonore du micro casque (micro et écouteur) ;
- diminuer le niveau de la sonnerie du téléphone fixe, favoriser les signaux lumineux ;
- ne pas utiliser le haut-parleur du téléphone ;
- mettre son téléphone portable sur vibreur ;
- lorsqu'un visiteur vient sur le plateau privilégier les espaces de collaboration et annexes pour le recevoir ;
- éviter les briefings individuels ou les formations au poste de travail ;
- ne pas accrocher de documents sur les cloisonnettes et panneaux muraux acoustiques.



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Optimisation – synthèse



The ABC's of acoustic design

Absorb (i.e. Ceiling Tiles)

Block (i.e. Cubicle Partitions)

Cover (i.e. Sound Masking)

V. Hongisto, Room Acoustics, lecture on Noise Control in Aalto University, nov. 2018



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Optimisation – synthèse

Absorb: Maximize absorption in ceiling, walls and screens

Block: Use high screens where privacy is needed

Cover: Use artificial speech masking sound



Original room acoustic ABC principle

Distance: Avoid desk-to-desk distances less than 2.5 m

Etiquette: Agree upon the use of and the behaviour in the space

Floor: Use soft floor coverings to reduce walking noise

Grouping: Group people and teams doing different work for efficient communication or concentration

Headset: High-quality headsets reduce speech effort & noise in telemeetings and phone calls

Isolation: Apply mobile pods, booths, where employees can move conversations or concentration demanding tasks

...

Manage: Involve the employees to the design process.



New principles which are needed in modern, space-efficient, flexible, activity-based offices

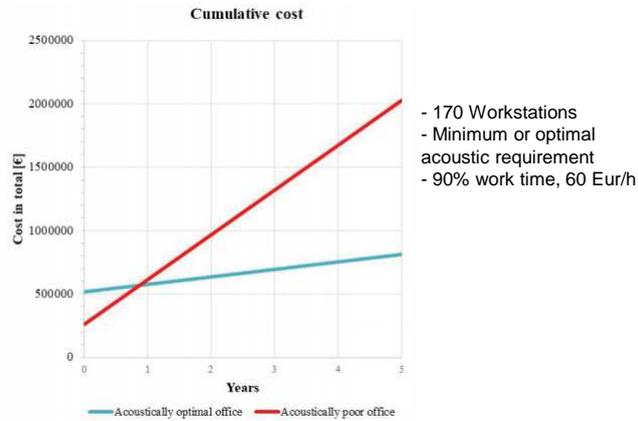
V. Hongisto, Room Acoustics, lecture on Noise Control in Aalto University, nov. 2018



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Coûts à long terme



M. Kylläinen, A. Saarinen, New Finnish building acoustic regulation. Proceedings ICA 2019, Aachen



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



6) Conclusion

- Le bruit dans les bureaux paysagers, en particulier les conversations intelligibles, entraîne une gêne et une baisse de performance
- La normalisation est relativement récente dans le domaine (2012-2019) au niveau national (F, D, FIN) et international (ISO 3382-3 et DIS 2295)
- Les principaux descripteurs sont spécifiques aux bureaux ouverts, indépendants entre eux et plus ou moins corrélés à la gêne
- **distance de distraction r_D [m]** est bien lié à la gêne, et dépend fortement du bruit de fond et de la hauteur des écrans. Les valeurs limites selon ISO doivent être revues à la baisse.
- Le **niveau sonore mesuré à 4 mètres $L_{p,A,S,4m}$ [dB(A)]** est moyennement lié à la gêne, et dépend de la hauteur des écrans
- **l'atténuation du niveau sonore par doublement de distance $D_{2,s}$ [dB]** très utilisée est cependant peu corrélée à la gêne (études à compléter) et dépend du temps de réverbération et de la hauteur des écrans



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



6) Conclusion

- L'analyse statistique de 22 bureaux mesurés en Suisse montre des caractéristiques similaires (hormis le $L_{p,A,S,4m}$ et $L_{p,A,B}$ plus faibles) aux données étrangères (108 bureaux en FIN, D, AUS).
- Cette base de données a été utilisée pour vérifier les corrélations et améliorer les formules de calcul analytique des divers descripteurs sur la base de divers paramètres physiques (h , H , α_{ceiling} , etc.). La prise en compte d'autres paramètres (caractérisation écrans, α_{wall} ou $\alpha_{\text{furniture}}$) pourrait permettre d'améliorer encore ces modèles.
- Cette base de données peut également servir dans le cadre de la future norme Suisse pour l'acoustique des salles SIA181/1 (descripteurs, valeurs limites et recommandations par exemple $0.4 < Tr < 0.6$ s et $h/H > 0.6$ ou $h > 1.5$)
- La qualité de l'acoustique des bureaux ouverts passe par l'optimisation du traitement acoustique de la salle, du layout, de la gestion des flux, du mobilier (en particulier écrans et salles de replis), des systèmes de communication (casques), du masquage sonore et des conditions d'utilisation. Investissement à long terme (santé, productivité, coûts).



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts



Merci pour votre attention!



Kaiseraugst 22.11.2019 Desarnaulds, Acoustique des bureaux ouverts

