

Simulations acoustiques d'environnements urbains

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi

Contenu

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

- Introduction
- Exemple 1: Projet Empa AbsFass
- Exemple 2: Projet Empa OSCAR
- (Incertitude / validations)
- Auralisation des passages de voitures dans le projet OSCAR
- Perspectives d'avenir : Simulation basés sur la théorie des ondes

Contenu

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

- **Introduction**
- Exemple 1: Projet Empa AbsFass
- Exemple 2: Projet Empa OSCAR
- (Incertitude / validations)
- Auralisation des passages de voitures dans le projet OSCAR
- Perspectives d'avenir : Simulation basés sur la théorie des ondes

■ Simulations

- pour les cours intérieures et les ensembles résidentiels,
- pour les sources sonores fixes et en mouvement,
- effet acoustique des façades (réfléchissant, absorbant, diffusant),
- effet acoustique de position des bâtiments.

➤ Qualité acoustique

➤ La gêne

- Pas de calcul standard (par exemple *Leq*)

■ Forschung

- Comparaison d'environnements virtuels dans des expériences auditives
- Corrélation avec des paramètres acoustiques de salle connus

■ Conseil par des bureaux d'ingénieurs

- Quartiers résidentiels / Cours intérieures

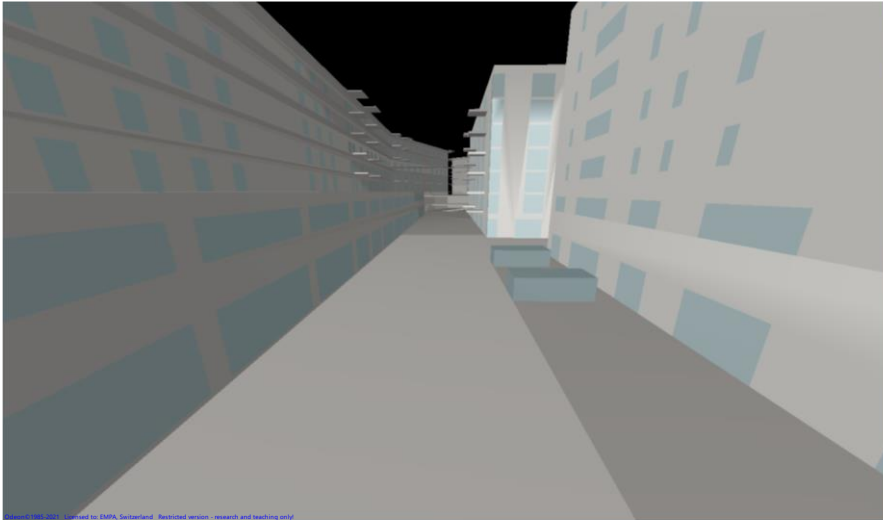
■ Heute: Knappe Darstellung von Ergebnissen

- Frühlingstagung SGA-SSA, Cercle Bruit, Empa 18. April 2024
- → Fokus auf Ergebnissen

Défi particulier 1/2

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

- « Salle » avec des surfaces complètement absorbantes - souvent unilatérales:



Défi particulier 2/2

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

- Focus sur les paramètres de l'acoustiques des salles comme T , EDT , G , ...
- Les effets de diffraction devraient être pris en compte, mais
 - les modèles physiques à l'échelle sont très coûteux
 - Simulation basée sur la théorie des ondes ? (voir plus tard)
 - Mesures dans un environnement réel - d'accord - mais l'environnement doit être construit ...
 - Un logiciel standard pour calculer les immissions sonores n'est pas suffisant
- Simulation de l'acoustique des salles **basée sur l'acoustique géométrique**, dans ce cas avec ODEON (odeon.dk)
- Désirable: simulation de sources sonores en mouvement

Contenu

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

- Introduction
- **Exemple 1: Projet Empa AbsFass**
- Exemple 2: Projet Empa OSCAR
- (Incertitude / validations)
- Auralisation des passages de voitures dans le projet OSCAR
- Perspectives d'avenir : Simulation basés sur la théorie des ondes

- *Question de base:*
Bonne qualité acoustique dans les cours intérieures: part de surface nécessaire avec absorption sur
 - façades,
 - sous-faces de balcons et
 - sols ?
- *Objectif de la simulation:*
 - Simulation d'un certain nombre de cours intérieures avec des variations de surfaces réfléchissantes et absorbantes.
- *Financement :*
 - Cercle Bruit, Empa
- Réalisé dans le cadre d'une thèse de bachelor à la Jade Hochschule Oldenburg (D)

Les simulations

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

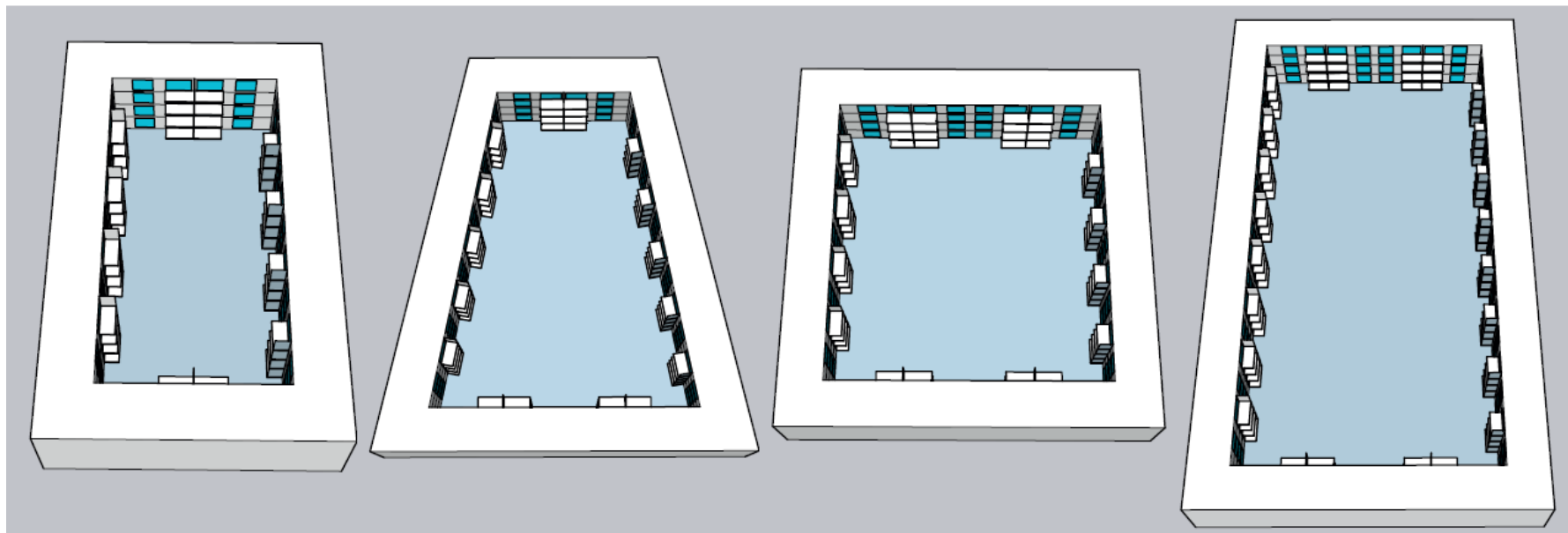
- Simulations acoustiques de salle avec ODEON version 16.11
 - 8 cours intérieurs génériques
 - 2 cours intérieurs réelles
- Simulations selon la méthode des matrices (Probst)

Cours intérieures étudiées

Générique: 4 et 7 étages

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

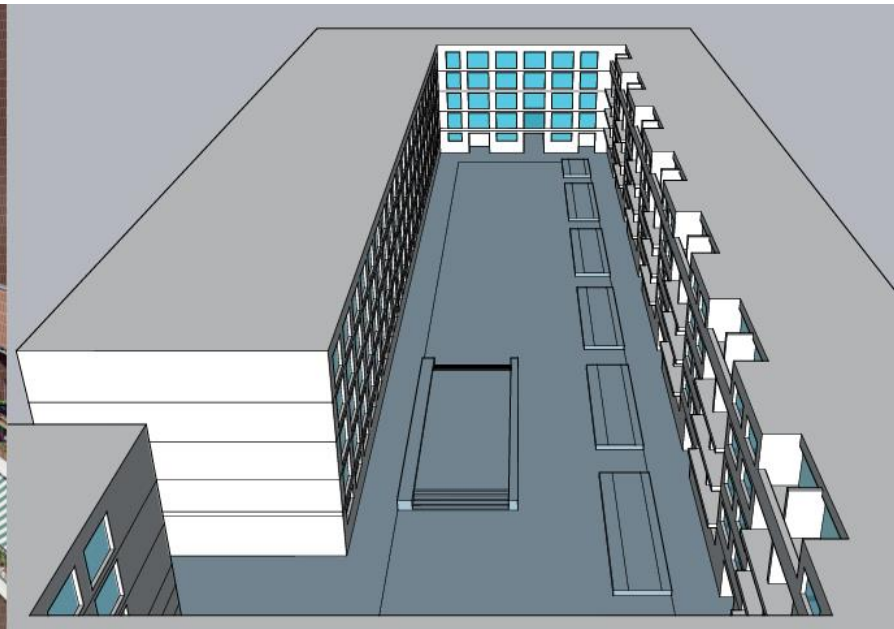
Présentation pour 4 étages:



Cours intérieures étudiées

Cour intérieure réelle #1

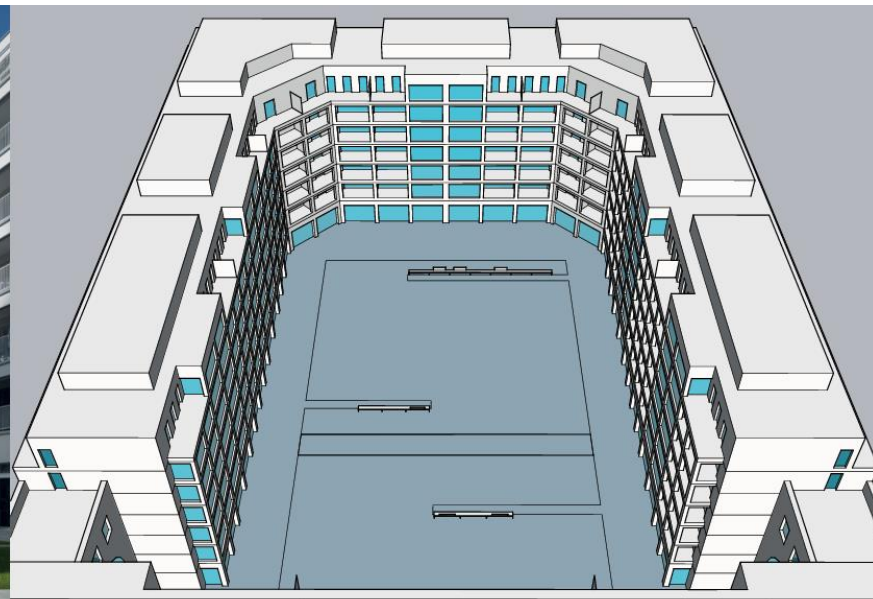
Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



Cours intérieures étudiées

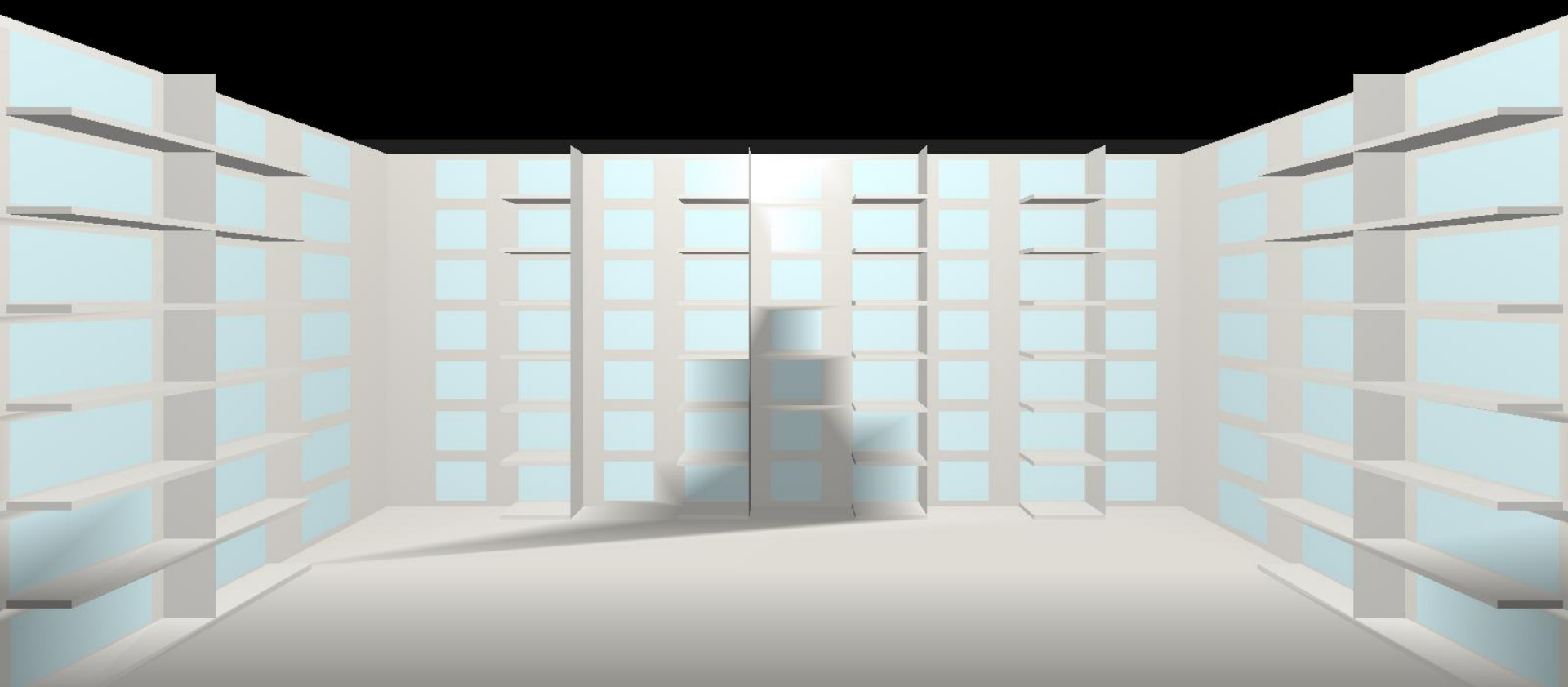
Cour intérieure réelle #2

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



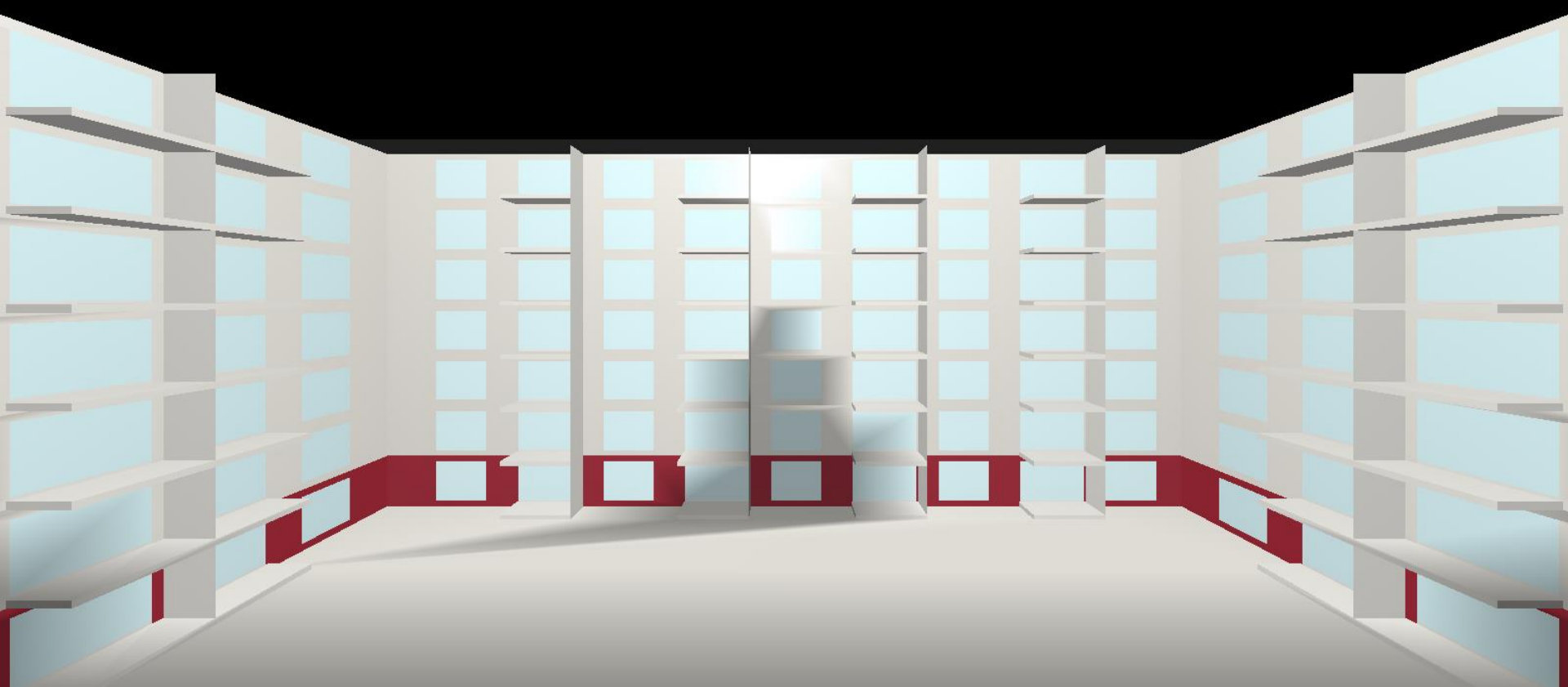
Exemple: Tout réfléchissant

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



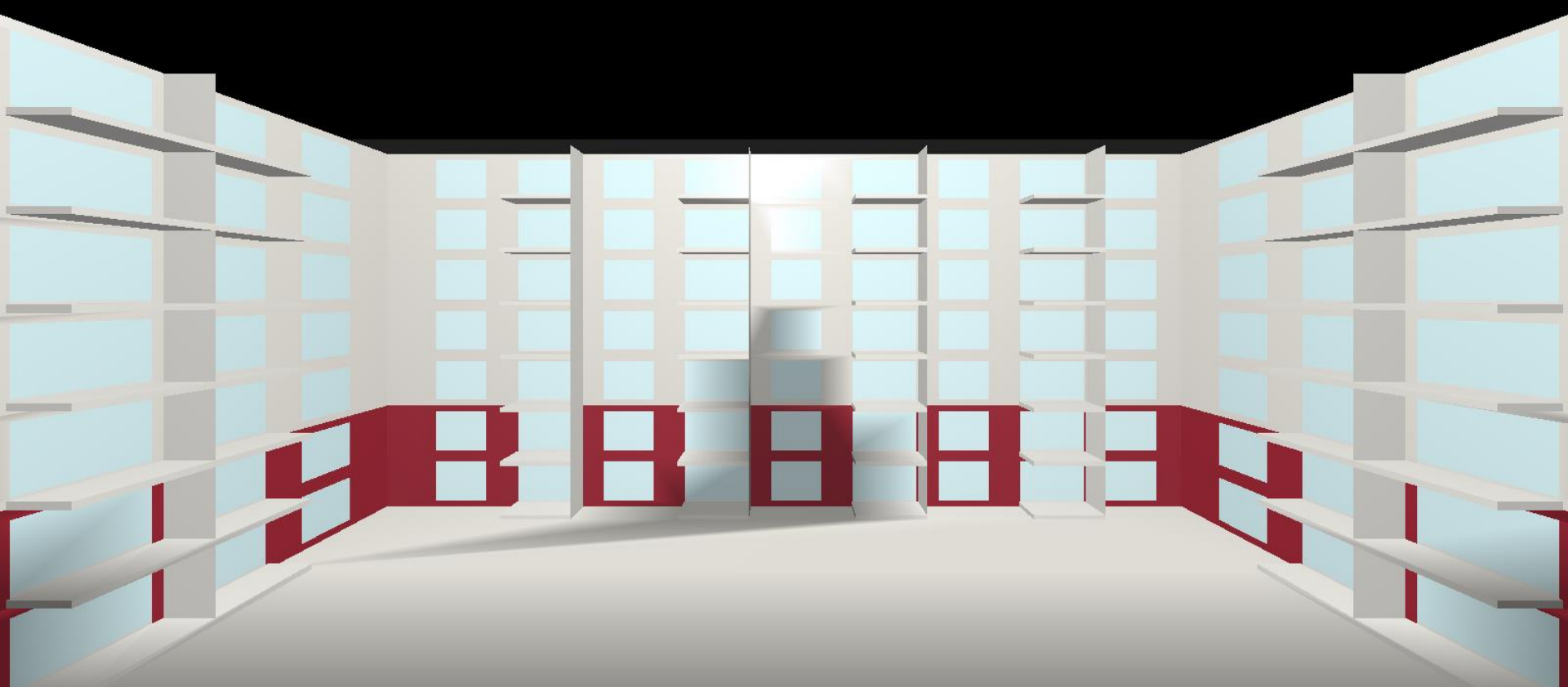
Exemple: Rez-de-chaussée absorbant

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



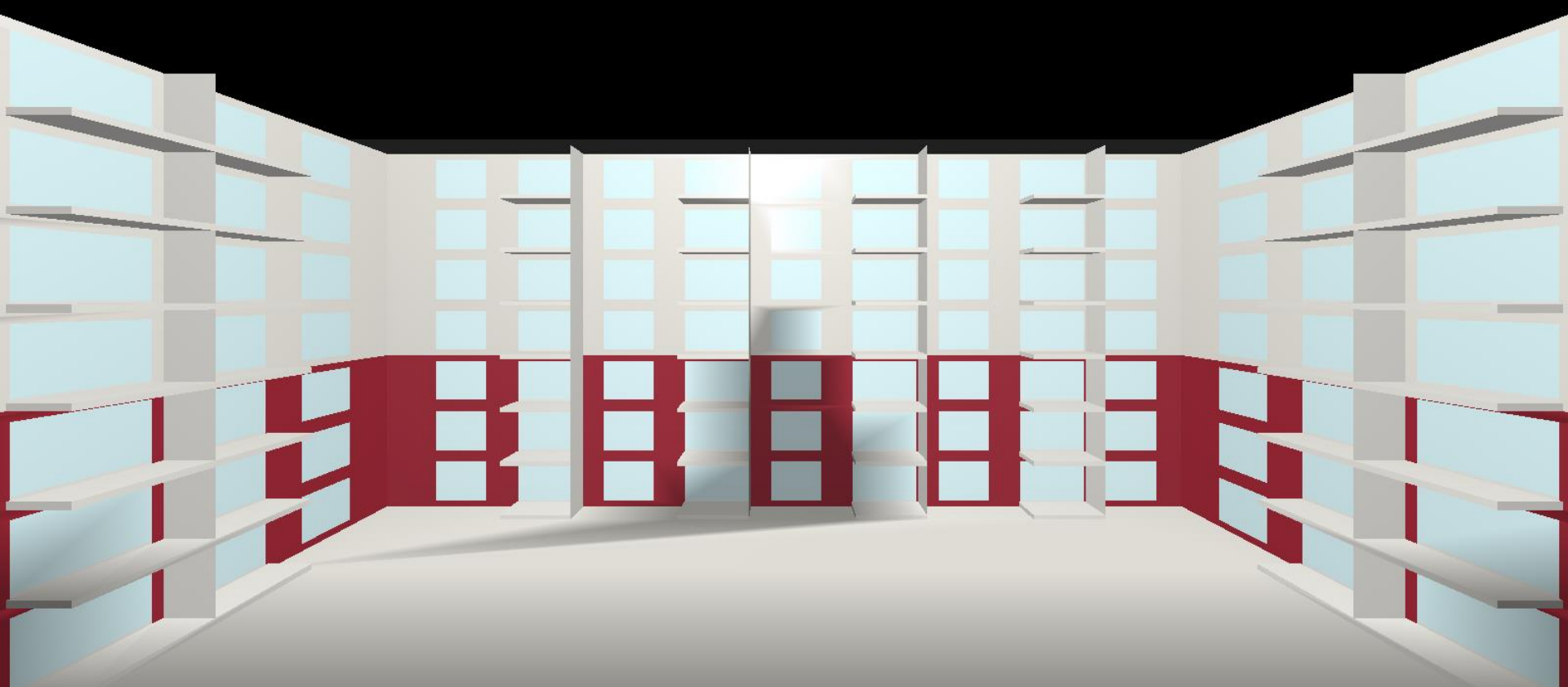
Exemple: + 1er étage absorbant

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



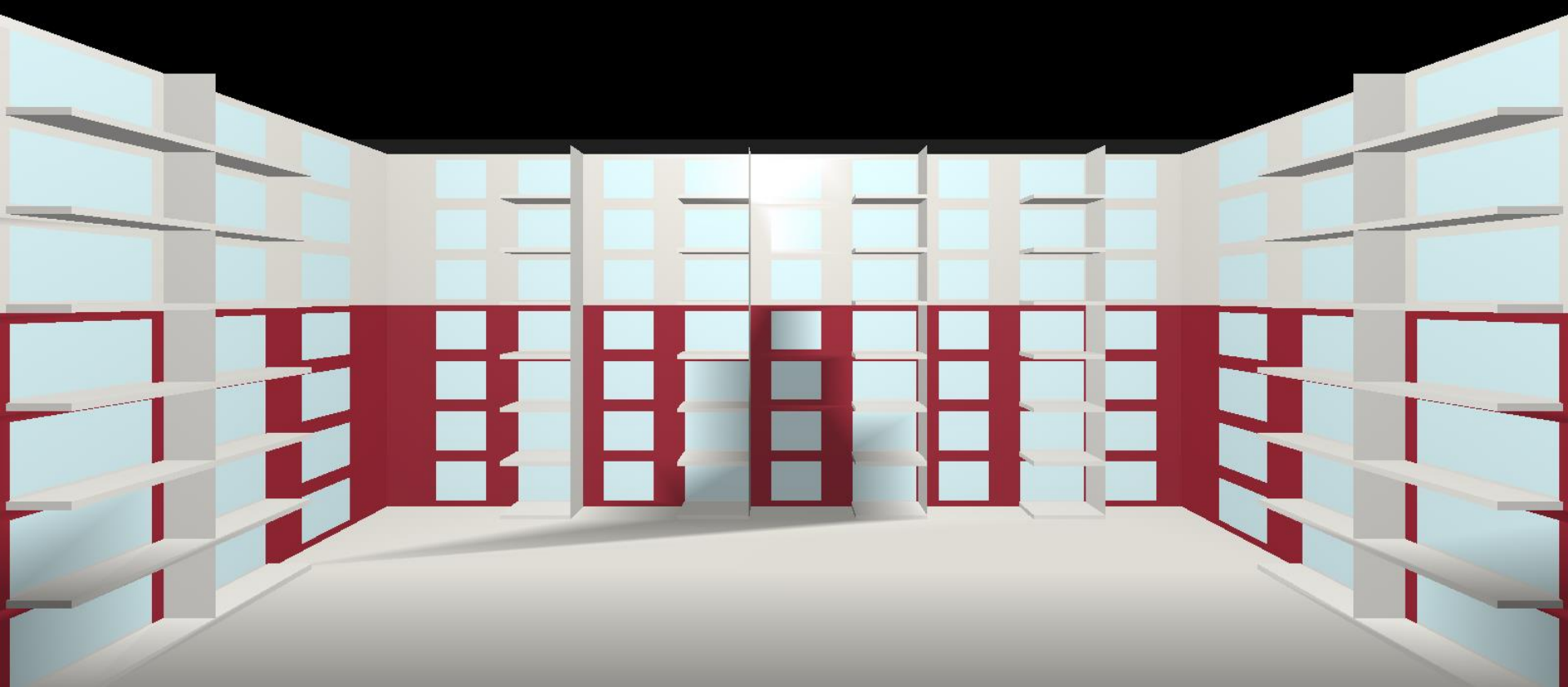
Exemple: + 2ème étage absorbant

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



Exemple: + 3ème étage absorbant

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



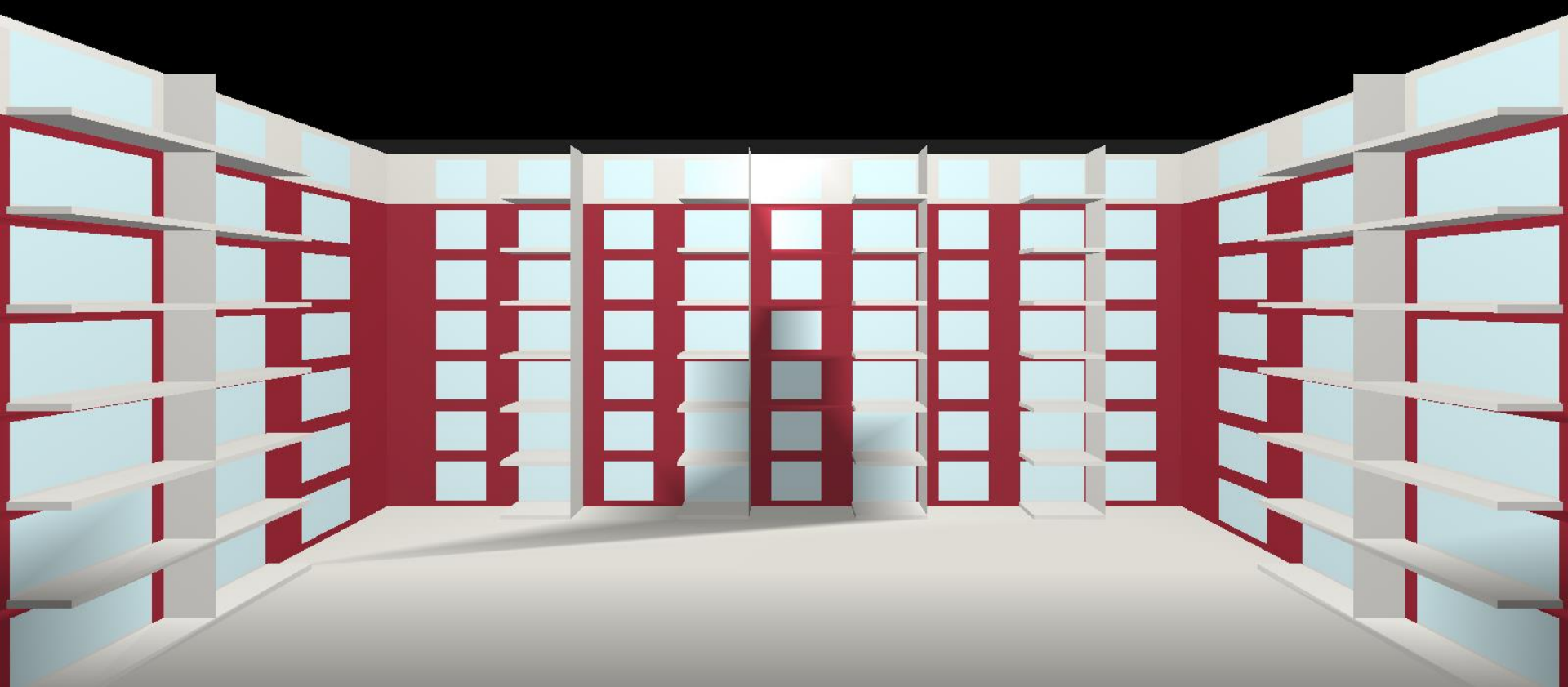
Exemple: + 4ème étage absorbant

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



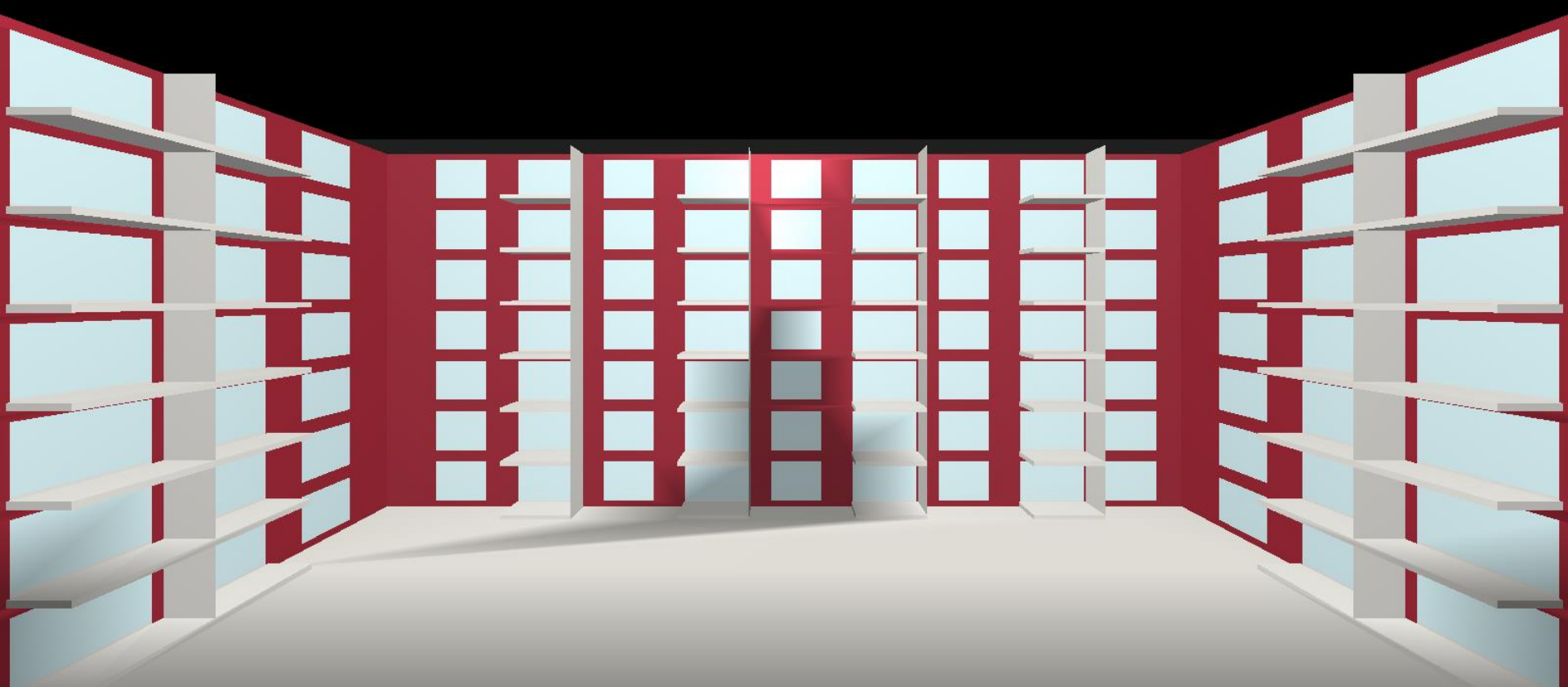
Exemple: + 5ème étage absorbant

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



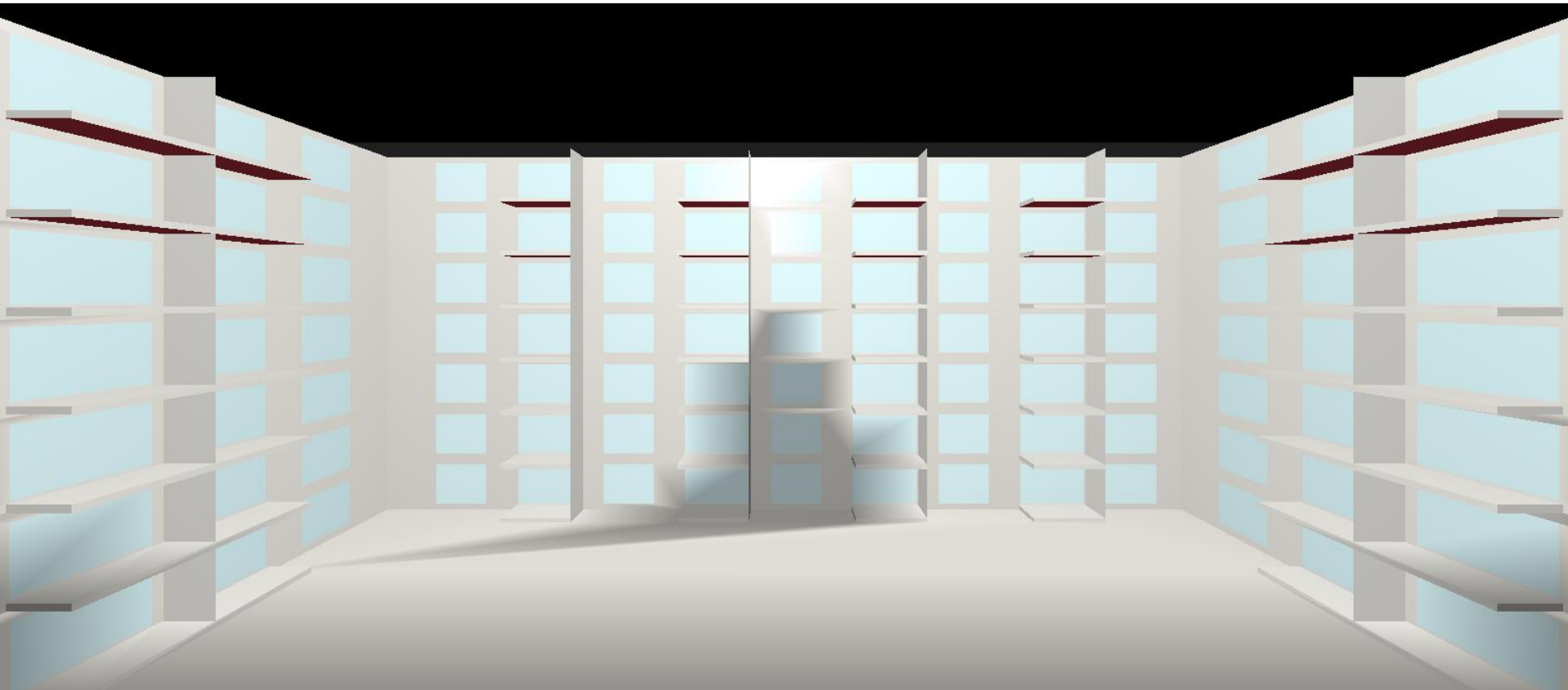
Exemple: + 6ème étage absorbant

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



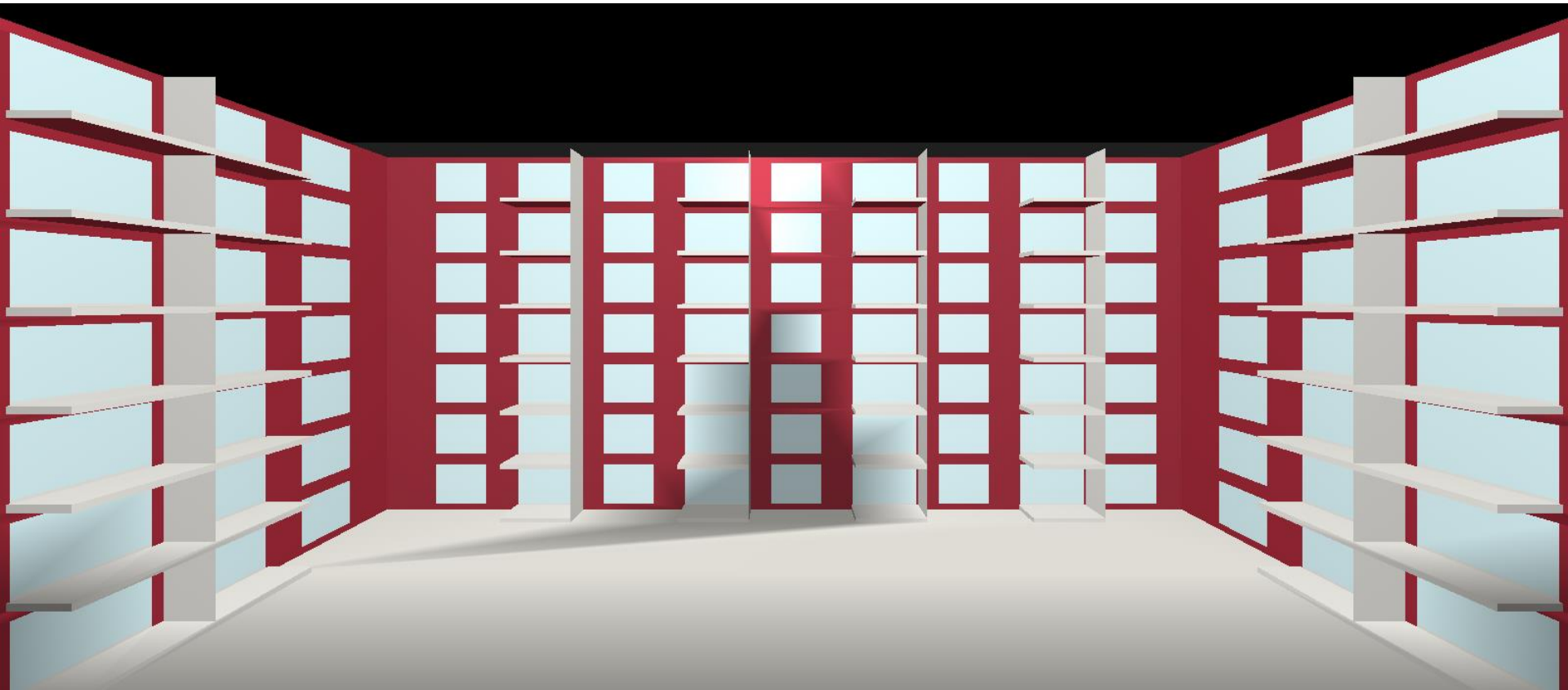
Uniquement les sous-faces de balcon absorbantes

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



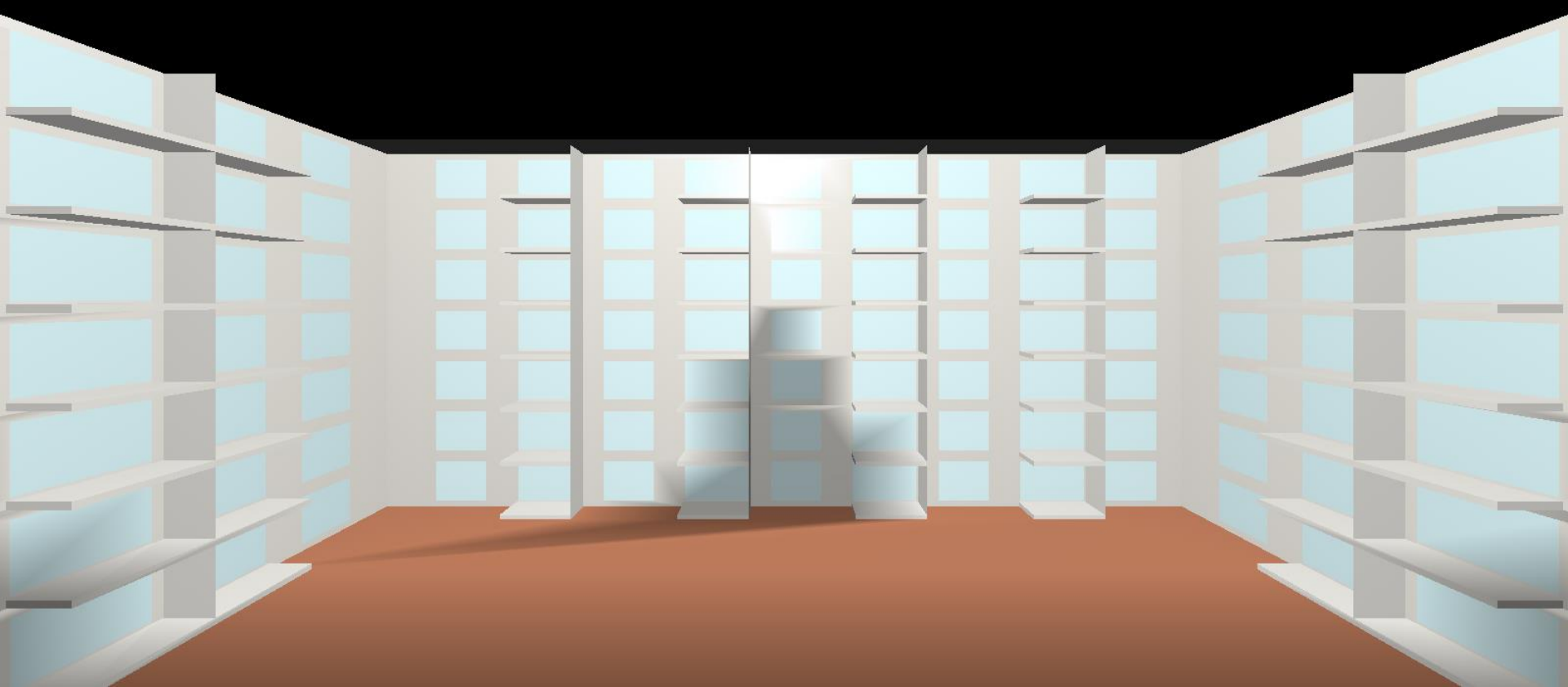
Exemple: Façades + sous-faces de balcons absorbantes

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



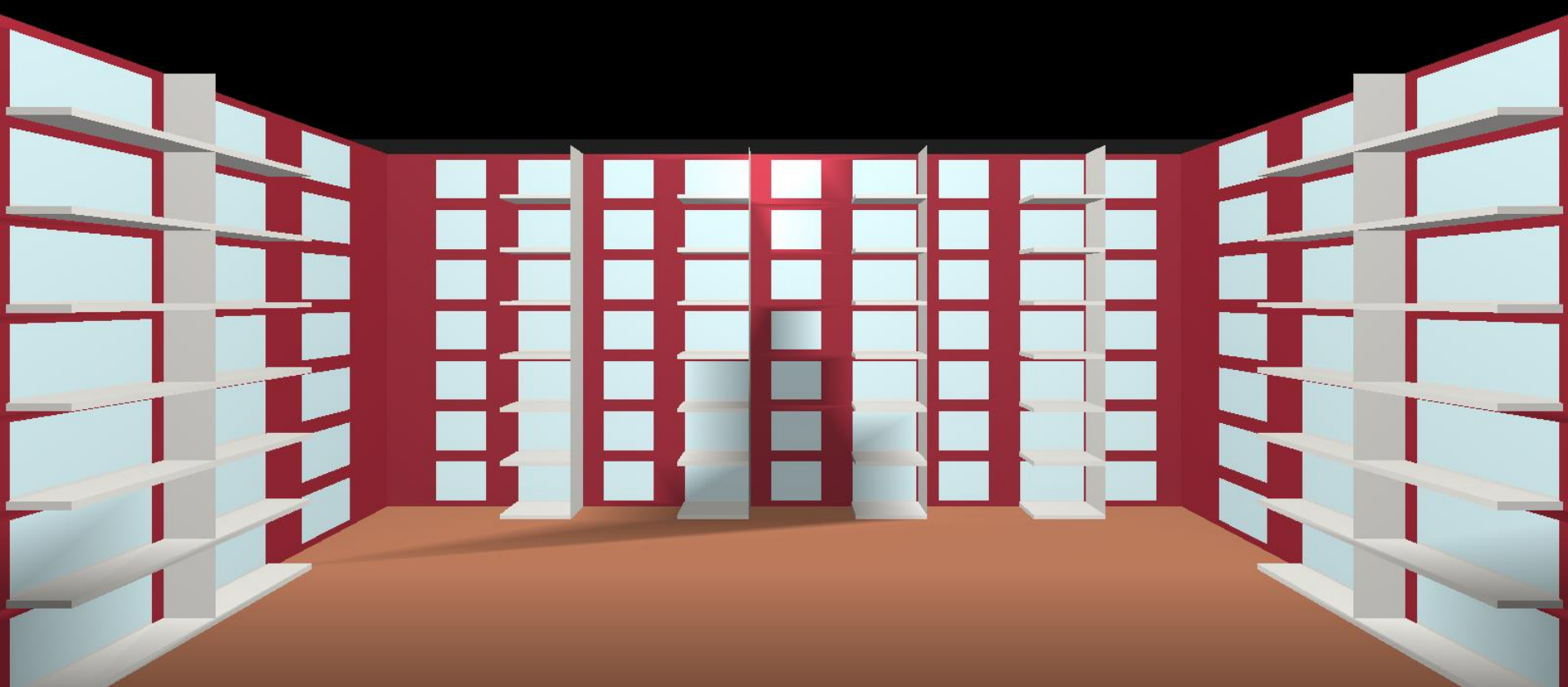
Exemple: Uniquement sol absorbant

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



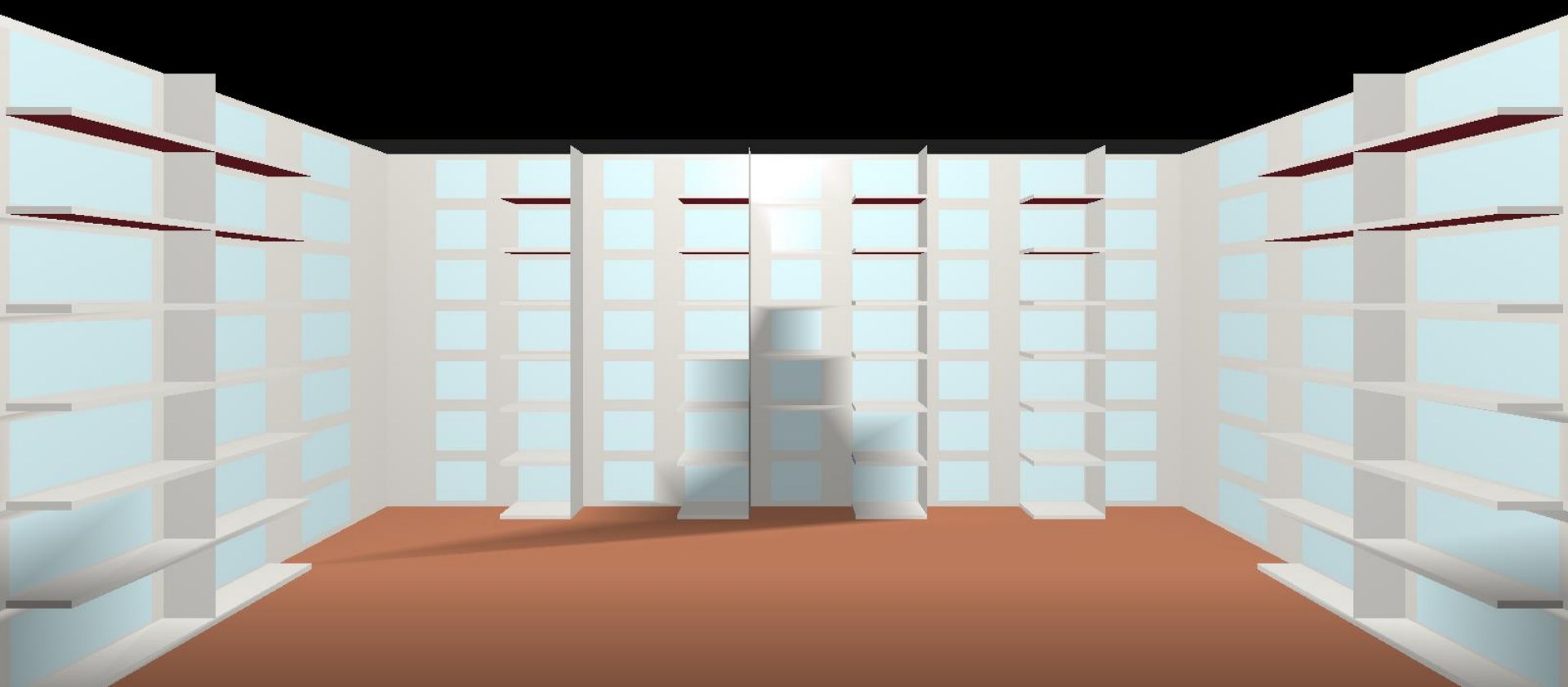
Exemple: Façades et sols absorbants

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



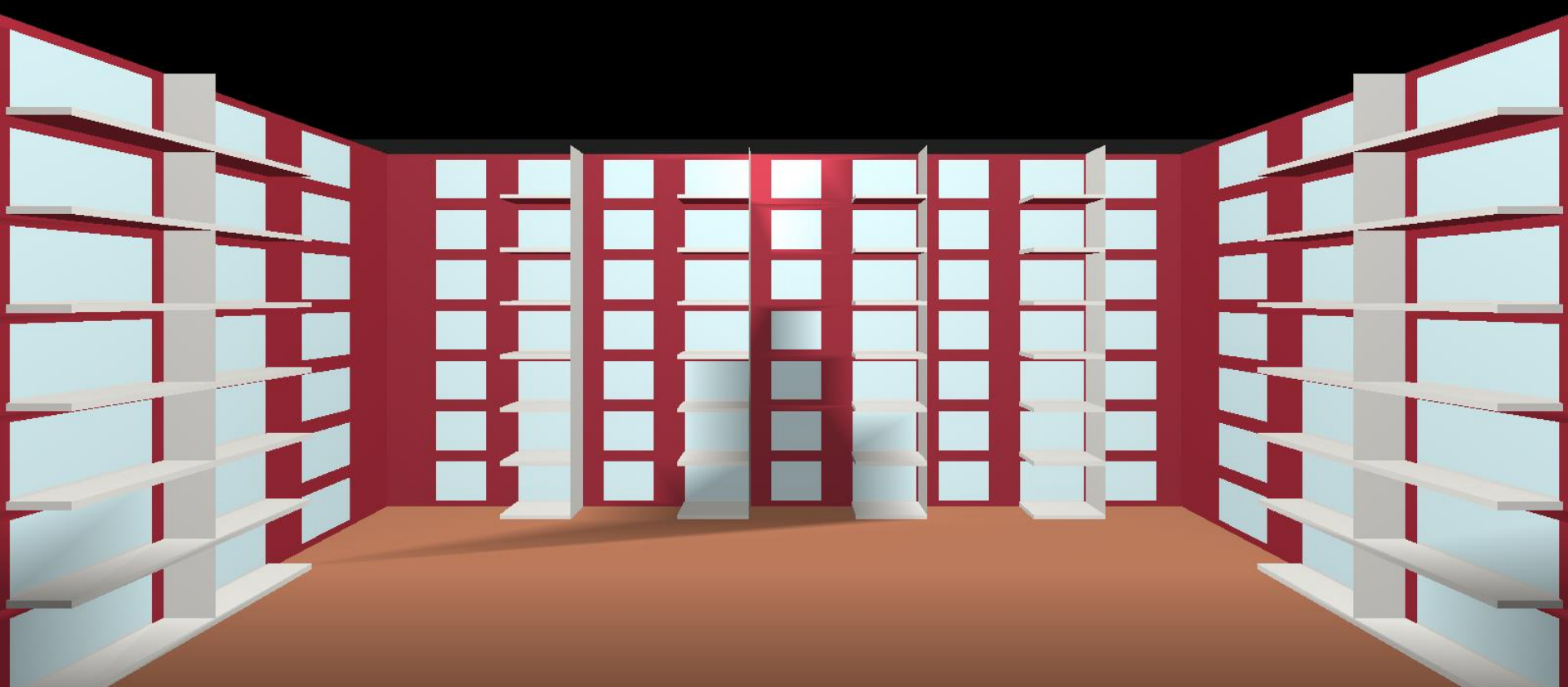
Exemple: Sol et sous-faces de balcons absorbants

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



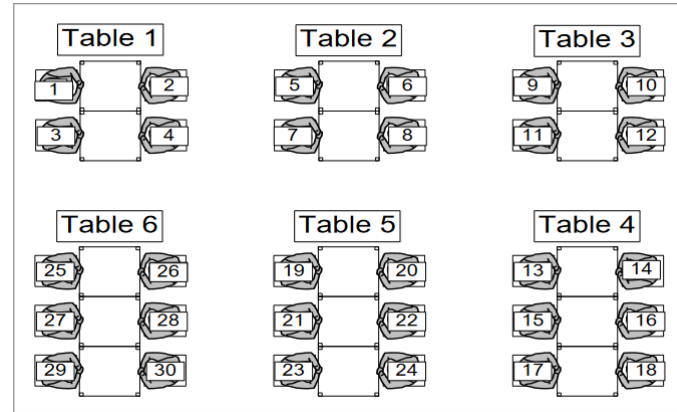
Exemple : Façades, sols et sous-faces de balcons absorbants

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



La méthode des matrices

- La méthode des matrices:
Wolfgang Probst*



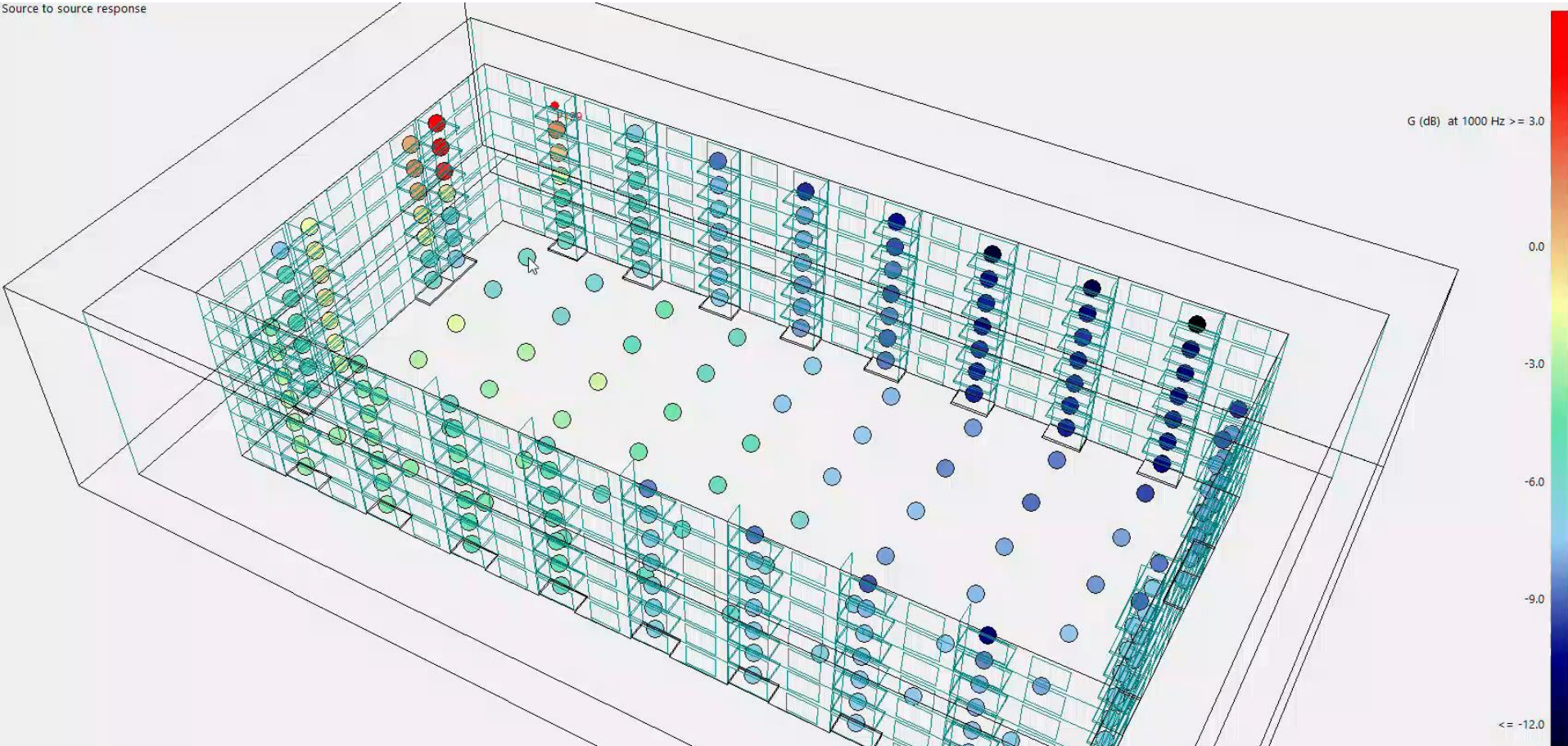
- Pourquoi pour les cours intérieures?
 - Des sources potentielles sont partout
 - Des récepteurs potentiels sont partout
- Un grand nombre de lignes de transmission calculées et évaluées pour cette étude
- Pour la pratique?

*Wolfgang Probst, Michael Böhm, Die STI-Matrix ein Verfahren zur Bewertung und Beurteilung von Restaurants Bueros und anderen Aufenthaltsräumen, Lärmbekämpfung Nr. 2/2018

La méthode des matrices

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

Source to source response



Explosion de la durée des calculs ...?

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

- Analyse de sensibilité sur le nombre de rayons sonores nécessaires
- Critère:
 - Changement juste perceptible (just noticeable difference): JND
 - Augmentation du nombre de rayons jusqu'à ce que la modification du résultat ne soit plus supérieure à JND que
 - pour 5% des chemins de transmission pour *EDT*, et
 - pour 15% des chemins de transmission pour T_{20})
 - Durée du calcul pour une situation jusqu'à 24 h ...

Principaux résultats pour les cours intérieures étudiées

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

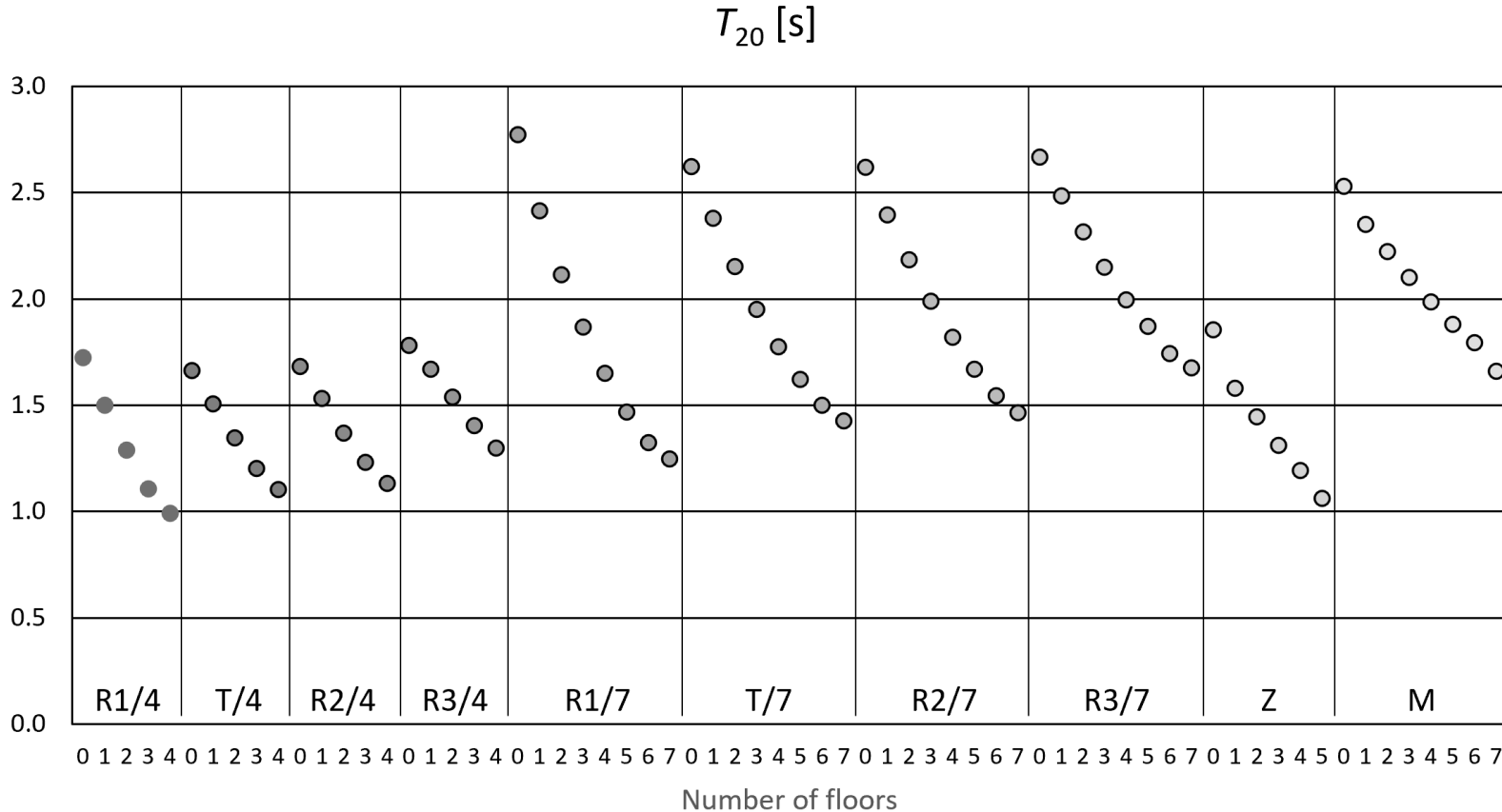
- Des études précédentes: Les façades absorbantes sont efficaces pour améliorer la qualité acoustique.
- Les façades partiellement absorbantes donnent des résultats nettement moins bons que celles qui absorbent toute la surface.
- Sols de cours intérieures ou sous-faces de balcons *seuls* ou *combinés*: pas d'amélioration essentielle en termes de réverbération, *mais* éventuellement des perturbations d'écho.

Pour la pratique:

- Recommandé: façades entières absorbantes
- A vérifier dans le *cas particulier*:
 - Risque d'échos/d'échos flottants?
 - Un sol absorbant ou des sous-faces de balcon absorbantes?

Exemple de résultats (valeurs moyennes)

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



Contenu

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

- Introduction
- Exemple 1: Projet Empa AbsFass
- **Exemple 2: Projet Empa OSCAr**
- (Incertitude / validations)
- Auralisation des passages de voitures dans le projet OSCAr
- Perspectives d'avenir : Simulation basés sur la théorie des ondes

- *Question de base :*
Influence des façades et de la position des bâtiments sur la gêne occasionnée par le passage d'un seul véhicule dans un quartier résidentiel urbain?
- *Objectif de la simulation:*
Préparer des stimuli pour des expériences
c.-à-d. l'auralisation du passage d'une voiture dans un quartier résidentiel urbain avec variation de
 - des façades (réfléchissant, absorbant, diffusant),
 - Position des bâtiments
- *Financement*
 - OFEV, Empa, avec la collaboration du cercle bruit Cercle Bruit

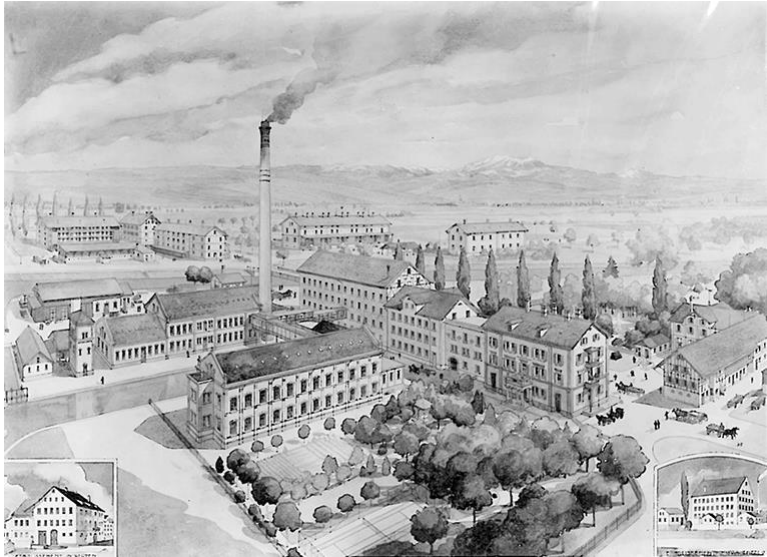
Simulations

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

- Simulations avec le logiciel ODEON
 - Grand quartier urbain
 - 4 récepteurs
 - 3 routes
 - 5 scénarios
- Auralisation de 46 passages
 - 46 Stimuli

Zwicky-Areal Wallisellen comme modèle

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



<http://www.zanoni-architekten.ch/>

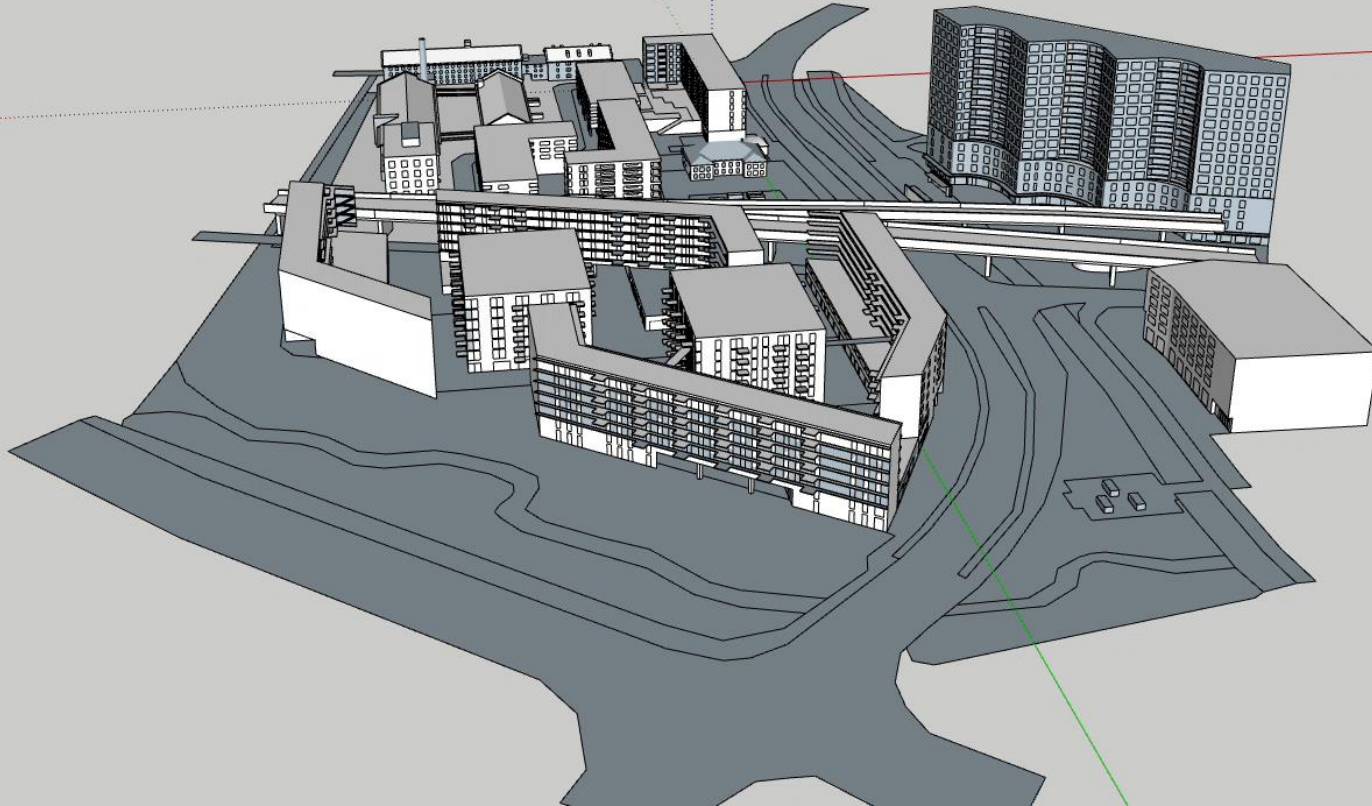


<https://www.immobilienbusiness.ch/>

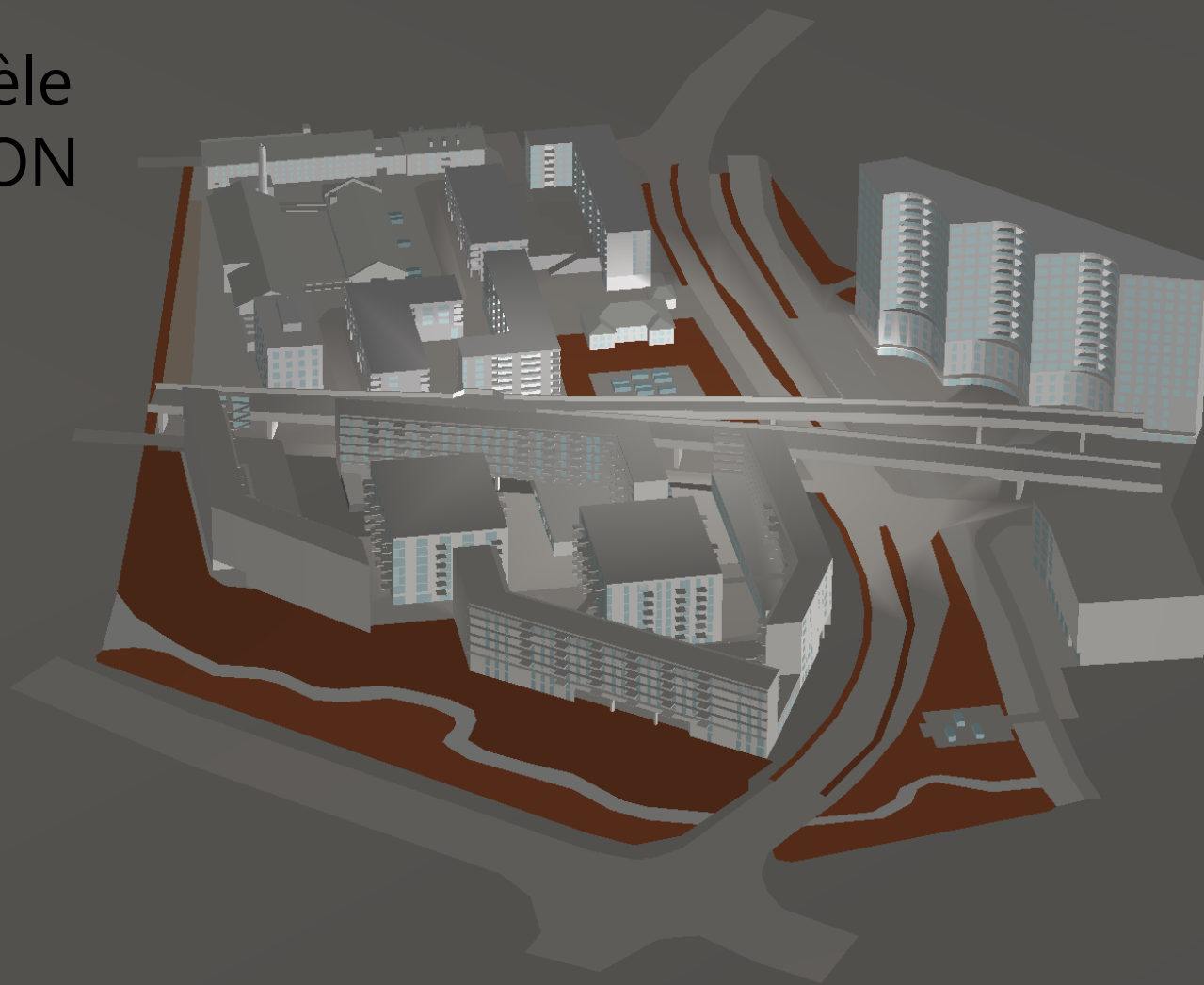


Sketch-Up Modell

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



Modèle ODEON



Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

Simulation avec le logiciel ODEON (version15) 1/2

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

- Auralisation de sources en mouvement impossible dans ODEON → Auralisation avec un outil développé à l'Empa

- Avec ODEON: Simulation pour des sources sonores ponctuelles sur la route à une distance de 10 m,

mais

- ❖ $h = 0.01$ cm au lieu de 0.00 cm , en raison de problèmes lors de la simulation avec ODEON

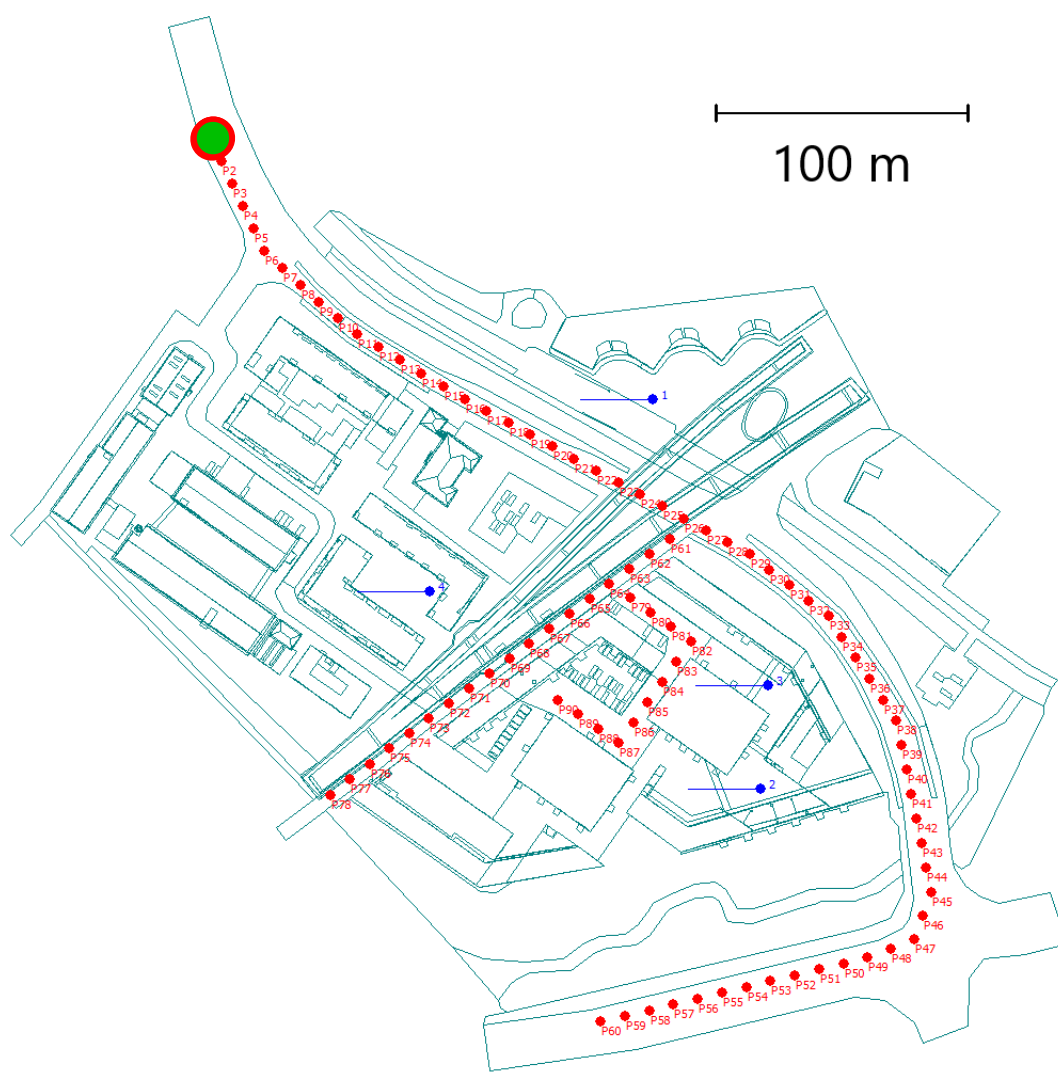
- ❖ Routes entièrement absorbantes

 - Supprimer la réflexion du sol pour éviter les effets de filtre en peigne et de flanging en fonction du temps

 - [effets très faibles dans la réalité, car la source sonore du véhicule est étendue]

ODEON

Modèle des routes



Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



- Calcul avec le mode raytracing pur
- **Analyse de sensibilité** par rapport au niveau de pression acoustique calculé:
 - 8'000'000 rayons nécessaires pour obtenir des résultats stables.
- Réponse impulsionnelle multicanal à un point (2D-Surround-Sound) pour chaque paire source-récepteur
- Auralisation → Kurt Heutschi

Les principaux résultats

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

Des tests de perception auditive indiquent que :

- **Façades absorbantes: moins de gêne que les façades diffusantes et réfléchissantes**
- Effet le plus fort aux positions d'écoute sans son direct ou avec peu de son direct (par ex. dans les cours intérieures ou sur les côtés des bâtiments opposés à la route)
- Façades diffusant légèrement moins gênantes que les façades réfléchissantes
- Rotation modérée des bâtiments (éviter les façades parallèles): moins de gêne
- Les jugements sont en corrélation avec le niveau de pression acoustique
- Une planification soigneuse des façades et de l'orientation des bâtiments est préférable.

Contenu

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

- Introduction
- Exemple 1: Projet Empa AbsFass
- Exemple 2: Projet Empa OSCAR
- **(Incertitude / validations)**
- Auralisation des passages de voitures dans le projet OSCAR
- Perspectives d'avenir : Simulation basés sur la théorie des ondes

- La simulation acoustique basée sur l'acoustique géométrique est établie
- Les possibilités et les limites sont connues:
 - Example: Round robin on room acoustical computer simulation*
- Approche d'une validation dans la thèse de bachelor AbsFass
- Premières études pour l'espace extérieur
 - Mesures acoustiques dans une cour intérieure + comparaison avec deux logiciels de simulation: ODEON et Pachyderm.
 - Premiers résultats: Forum Acusticum Torino 2023
- Méthode de simulation basée sur la théorie des ondes ? (→ Kurt Heutschi)

*I. Bork, Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation–Part II: Calculations, Acta Acust. United Acust. 91 (2005)

I. Bork, Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation–Part I: Measurements, Acta Acust. United Acust. 91 (2005)

I. Bork, A comparison of room simulation software the 2nd round robin on room acoustical computer simulation, Acta Acust. United Acust. 86 (2000)

M. Vorländer, International Round Robin on room acoustical computer simulations. Proceedings of 15th ICA, Trondheim

**E. Badino, L. Shtrepi, A. Astolfi, V. Serra, An Evaluation of Geometrical Room Acoustics Simulations in Outdoor Settings, 10th Convention of the European Acoustics Association, Forum Acusticum 2023, Torino

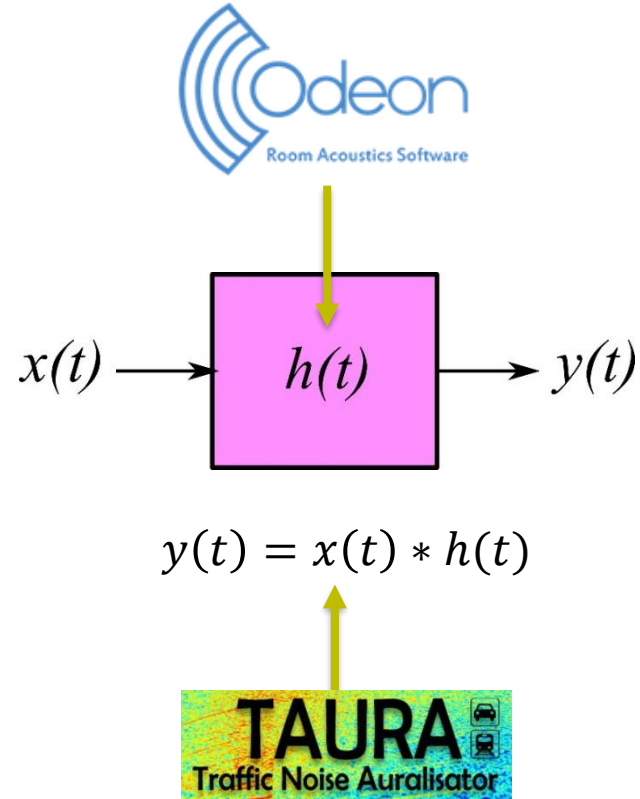
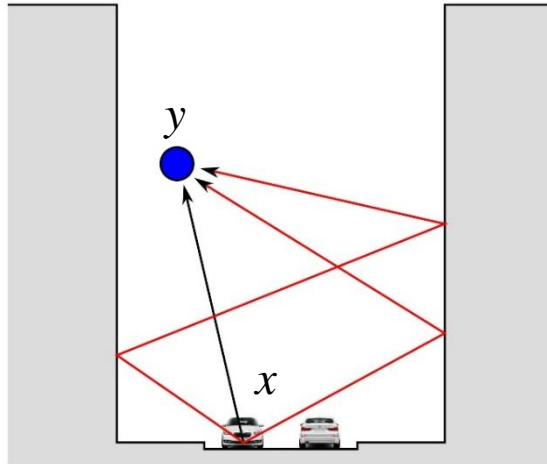
Contenu

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

- Introduction
- Exemple 1: Projet Empa AbsFass
- Exemple 2: Projet Empa OSCAR
- (Incertitude / validations)
- **Auralisation des passages de voitures dans le projet OSCAR**
- Perspectives d'avenir : Simulation basés sur la théorie des ondes

Auralisation: principle

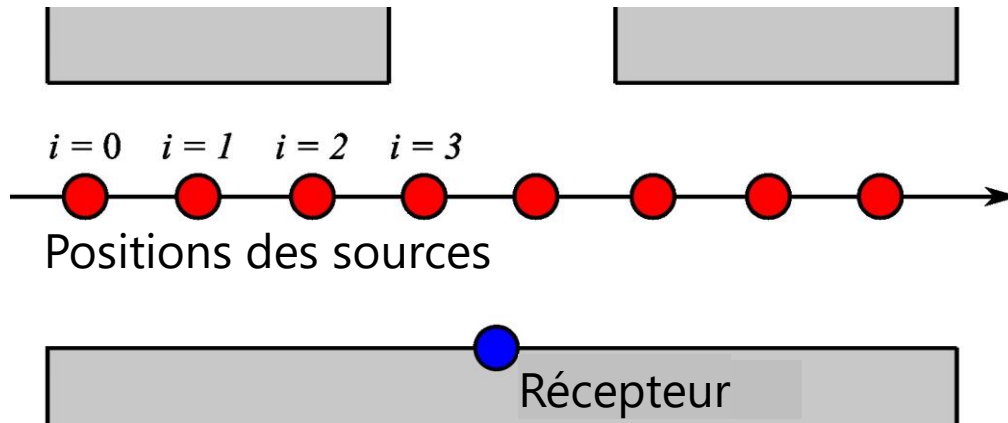
Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



Auralisation d'une source en mouvement: Concept

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

- Discrétisation du passage d'un véhicule en positions individuelles et calcul de la réponse impulsionnelle position par position

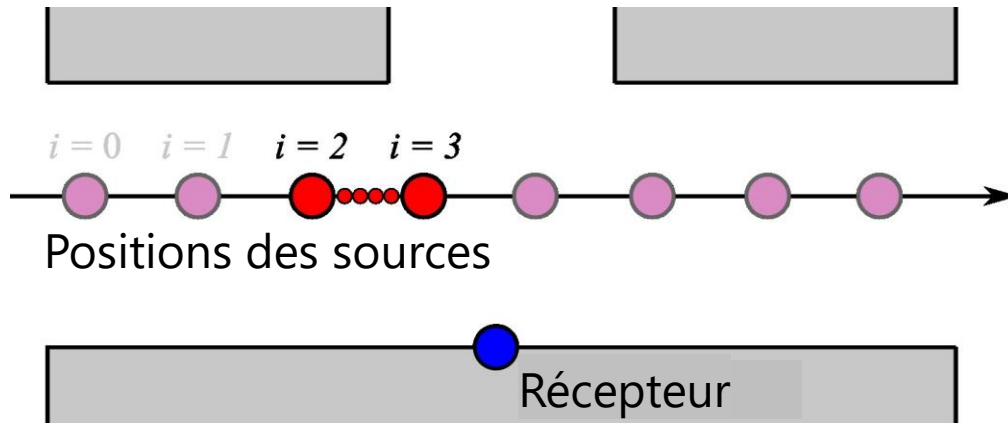


$$h_0(t), h_1(t), \dots, h_{N-1}(t)$$

Auralisation d'une source en mouvement: Concept

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

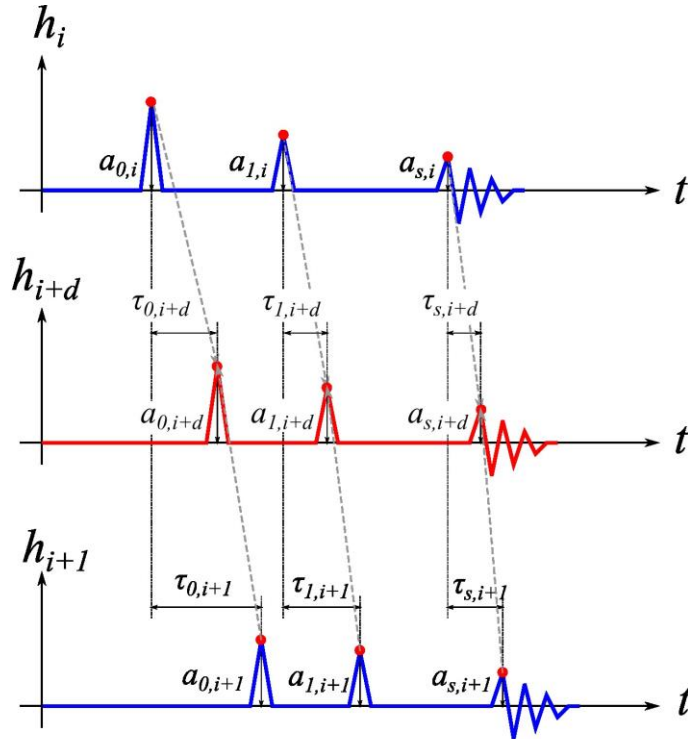
- Mais : des réponses impulsionnelles sont nécessaires pour n'importe quelle position intermédiaire :



Cherché: stratégie
pour l'interpolation
géométrique de
réponses
impulsionnelles

Auralisation d'une source en mouvement: Interpolation

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

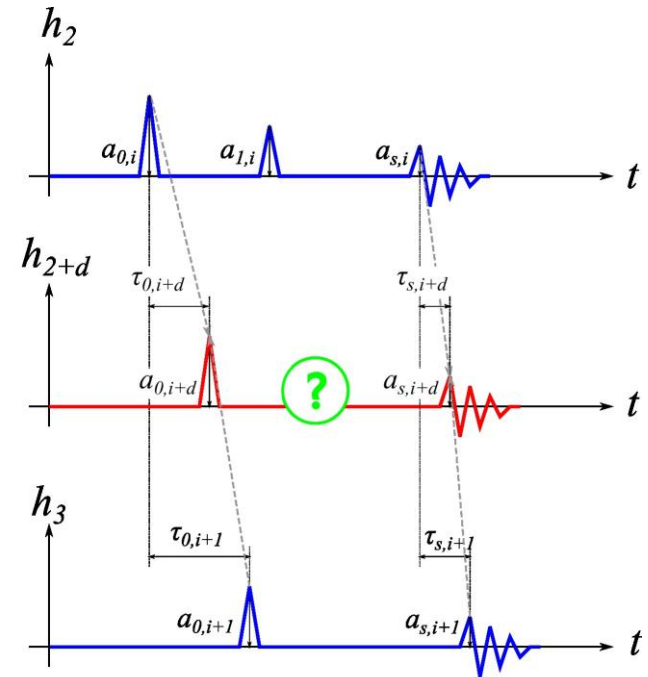
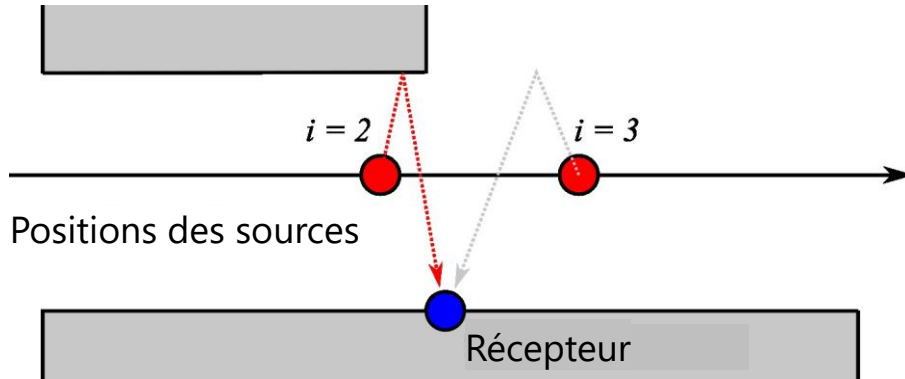


- Décomposition en contributions individuelles
- Interpolation en
 - temps
 - amplitude

Auralisation d'une source en mouvement: Difficulté d'interpolation

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

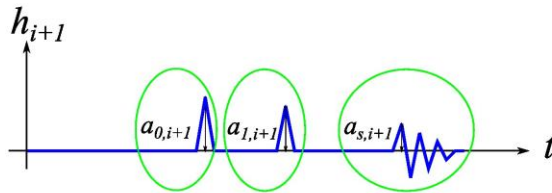
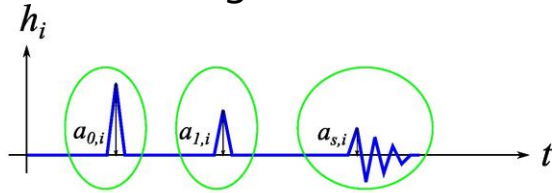
- L'attribution des différentes contributions n'est pas toujours claire



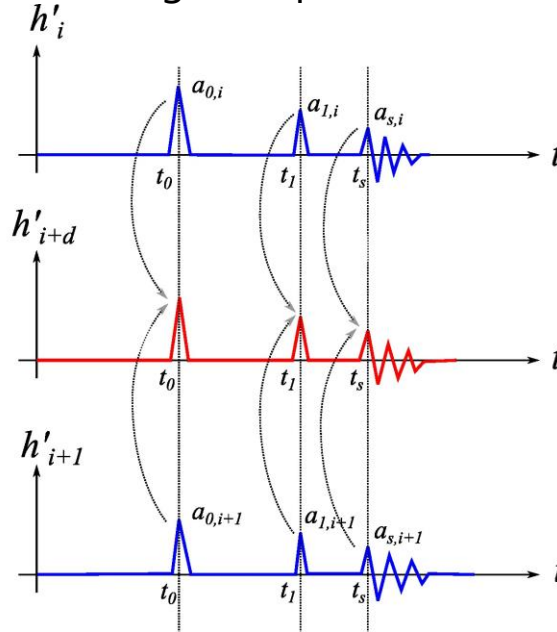
Auralisation d'une source en mouvement: première approche: réponses impulsionnelles génériques

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

Réponses impulsionnelles originales



Réponses impulsionnelles génériques



Appliquer l'effet
Doppler au signal
d'émission

Auralisation d'une source en mouvement: deuxième approche: cross-fading

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

Réponse impulsionnelle interpolée : $h_{n+d} = (1 - d) \cdot \tilde{h}_n + d \cdot \tilde{h}_{n+1}$

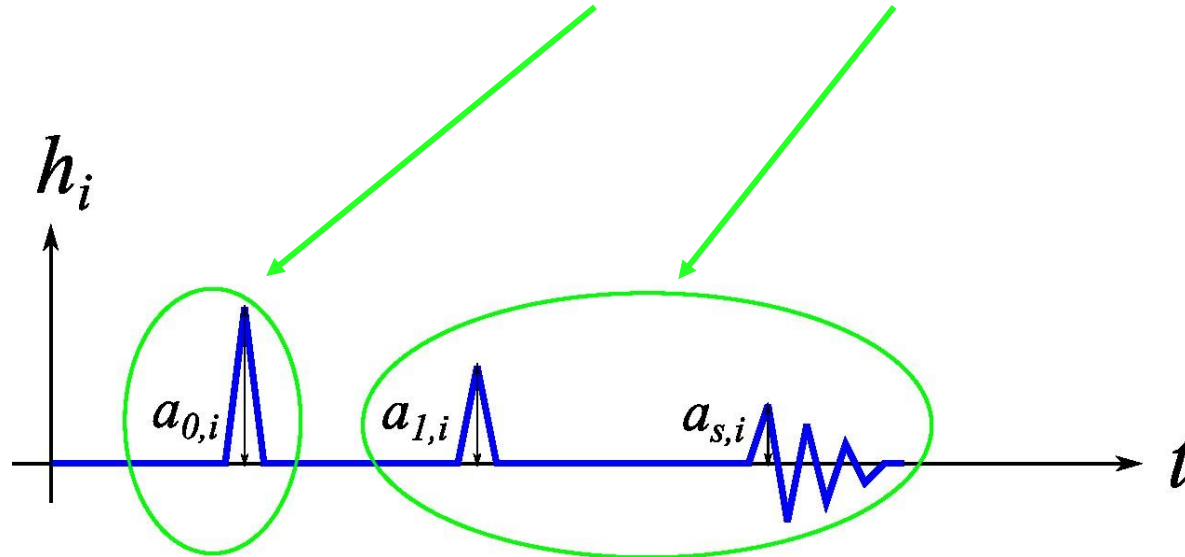
\tilde{h}_n : Estimation de h_{n+d} basée sur h_n

\tilde{h}_{n+1} : Estimation de h_{n+d} basée sur h_{n+1}

Auralisation d'une source en mouvement: deuxième approche: cross-fading

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

Traitement séparé du son direct et des réflexions :



Auralisation d'une source en mouvement: deuxième approche: cross-fading

- **Son direct:**

- Mise à l'échelle de l'amplitude en \tilde{h}_n et \tilde{h}_{n+1} : interpolation linéaire à partir des amplitudes en h_n et h_{n+1}
- Délai en \tilde{h}_n et \tilde{h}_{n+1} : Interpolation d'ordre supérieur à partir des temps de propagation en h_{n-1} , h_n , h_{n+1} et h_{n+2}

Auralisation d'une source en mouvement: deuxième approche: cross-fading

■ Réflexions:

- Mise à l'échelle de l'amplitude \tilde{h}_n und \tilde{h}_{n+1} : interpolation linéaire à partir des énergies en h_n et h_{n+1}
- Délai en \tilde{h}_n und \tilde{h}_{n+1} : interpolation linéaire à partir de la corrélation croisée de h_n et h_{n+1}

Auralisation d'une source en mouvement

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

- Conclusion:
 - La génération de signaux d'immissions plausibles (même à plusieurs canaux) est possible
 - Le procédé est robuste, généralement libre d'artefacts.
 - On cherche des idées pour une compression de l'axe temporel (neutre en fréquence) dans l'approche du crossfading.

Contenu

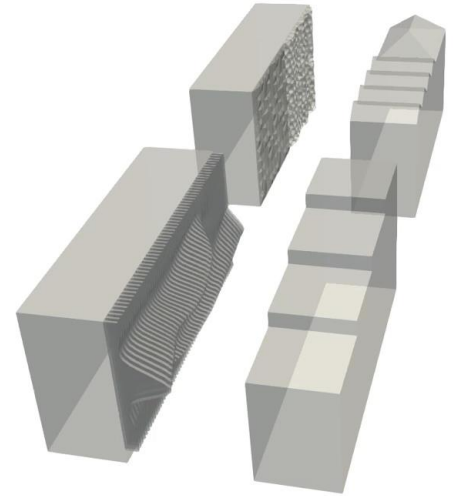
Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

- Introduction
- Exemple 1: Projet Empa AbsFass
- Exemple 2: Projet Empa OSCAR
- (Incertitude / validations)
- Auralisation des passages de voitures dans le projet OSCAR
- **Perspectives d'avenir: Simulation basés sur la théorie des ondes**

Perspectives d'avenir

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

- Outil d'auralisation pour les planificateurs et les architectes
 - Athari, S. (2023). A hybrid acoustics simulation of 3D urban street canyon design scenarios with multiple reflections used for auralising a moving sound source [PhD thesis, ETH Zurich]
- Accélération par l'utilisation de GPU
 - Montanaro, H., Knöpfel, J., Heutschi, K., & Pieren, R. (2022). Parallelized FDTD simulations to improve engineering models of urban road traffic noise. In ICA 2022 proceedings.
 - Montanaro, H., Lincke, D., Van Renterghem, T., Heutschi, K., & Pieren, R. (2023). Memory efficient GPU-accelerated 3D FDTD acoustic simulations in turbulent fields. Forum Acusticum 2023.



<https://www.youtube.com/@SahandAthari/videos>

Publications de l'Empa

OSCAR: Empa Bericht 5211.01616: Klangbewusste Gestaltung von Gebäuden: Akustische Gestaltung von Gebäudearchitektur und Aussenraumgestaltung - Schlussbericht 10. August 2021. [Link](#)

AbsFass: Empa Bericht 5214.027540 Akustische Wirkung von schallabsorbierenden Fassaden in Hinterhofsituationen: 16. Juni 2021. [Link](#)

Athari, S. (2023). A hybrid acoustics simulation of 3D urban street canyon design scenarios with multiple reflections used for auralising a moving sound source [Doctoral dissertation, ETH Zurich]. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000607512>

Eggenschwiler, K., Jansohn T., Blau M., Schäffer, B. Effects of sound absorbing facades on the acoustical quality in different simulated inner courtyard situations, submitted Acta Acustica 2023

Eggenschwiler, K., Heutschi, K., Taghipour, A., Pieren, R., Gisladdottir, A., & Schäffer, B. (2022). Urban design of inner courtyards and road traffic noise: influence of façade characteristics and building orientation on perceived noise annoyance. Building and Environment, 224, 109526 (17 pp.). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109526>

Gisladdottir, A., Heutschi, K., Taghipour, A., Pieren, R., & Eggenschwiler, K. (2020). Influence of facade characteristics on perceived annoyance from moving cars in urban living environments. In Proceedings of the FA2020 conference (pp. 77-82). <https://doi.org/10.48465/fa.2020.0079>

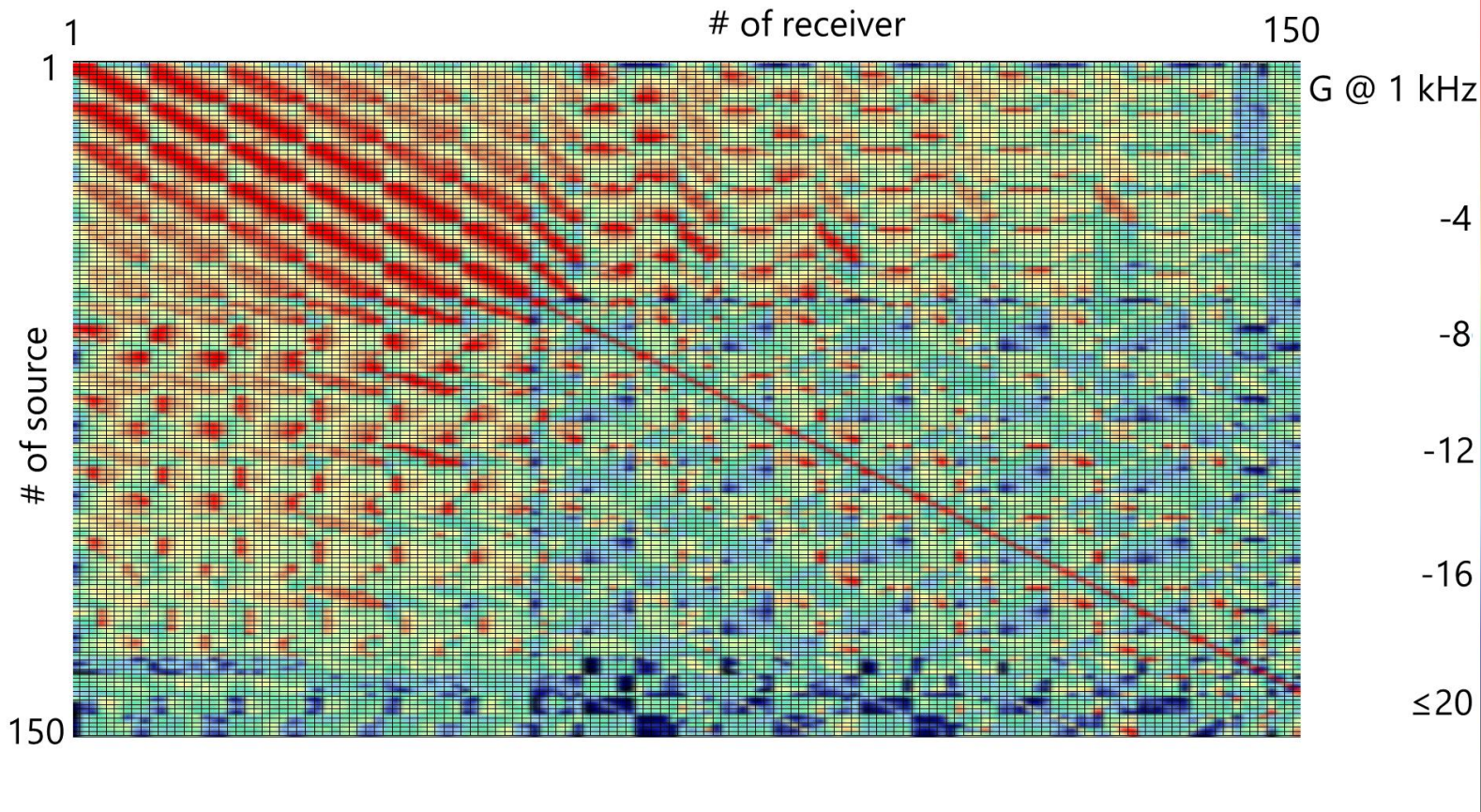
Taghipour, A.; Athari, S.; Gisladdottir, A.; Sievers, T.; Eggenschwiler, K. Room acoustical parameters as predictors of acoustic comfort in outdoor spaces of housing complexes. Front. Psychol. 2020, 11, 344 (17 pp.). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00344>

Taghipour, A.; Sievers, T.; Eggenschwiler, K. Acoustic comfort in virtual inner yards with various building facades. Int. J. Environ. Res. Public Health 2019, 16 (2), 249 (20 pp.). <https://doi.org/10.3390/ijerph16020249>

Sievers, T.; Eggenschwiler, K.; Taghipour, A.; Blau, M. Untersuchungen zur raumakustischen Aufenthaltsqualität in Innenhöfen von Wohnbauten. Presented at the DAGA 2018, München, Germany, March 19-22, 2018; DEGA; pp 1038-1041.

La méthode des matrices

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



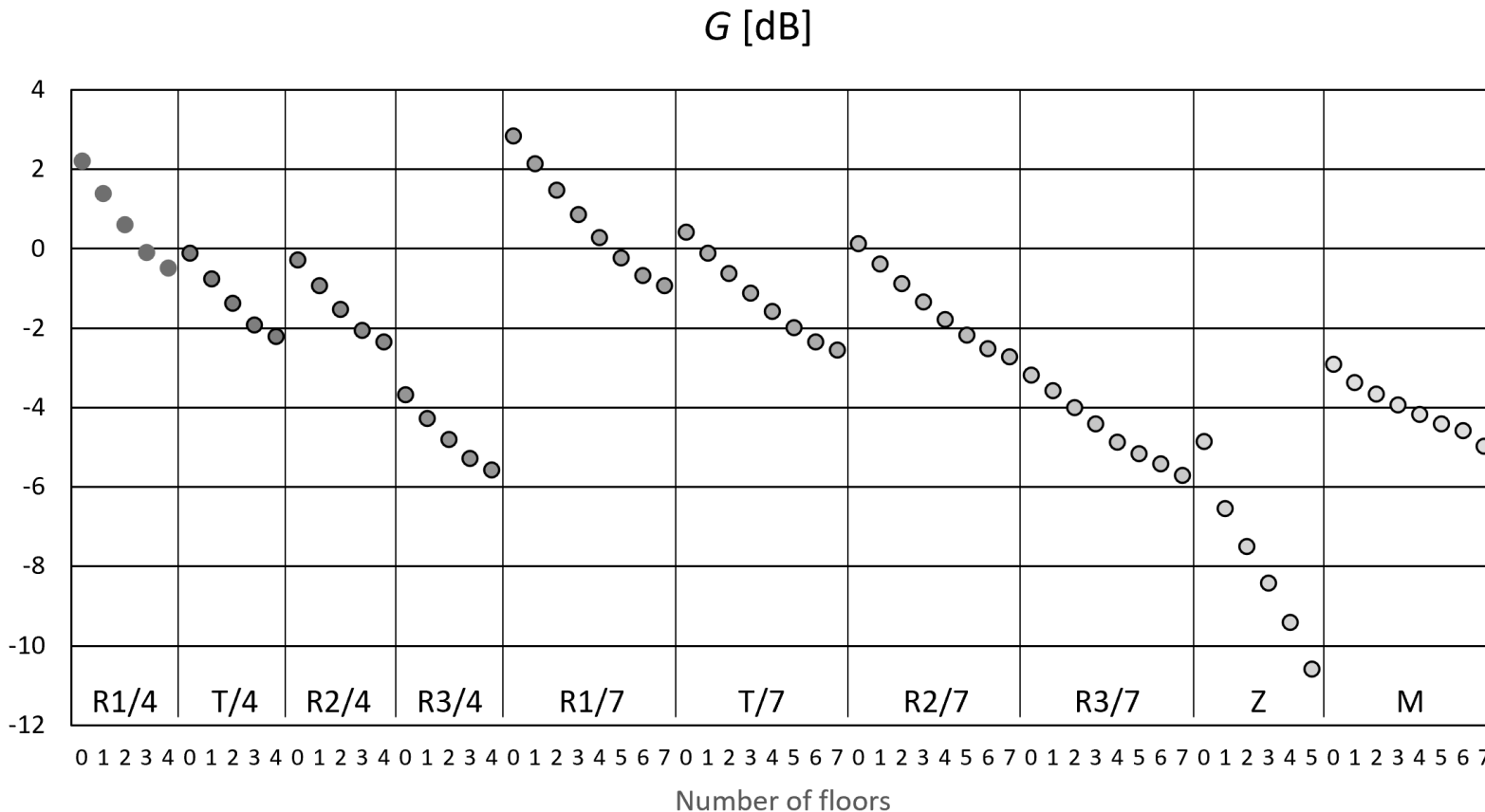
La méthode des matrices

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

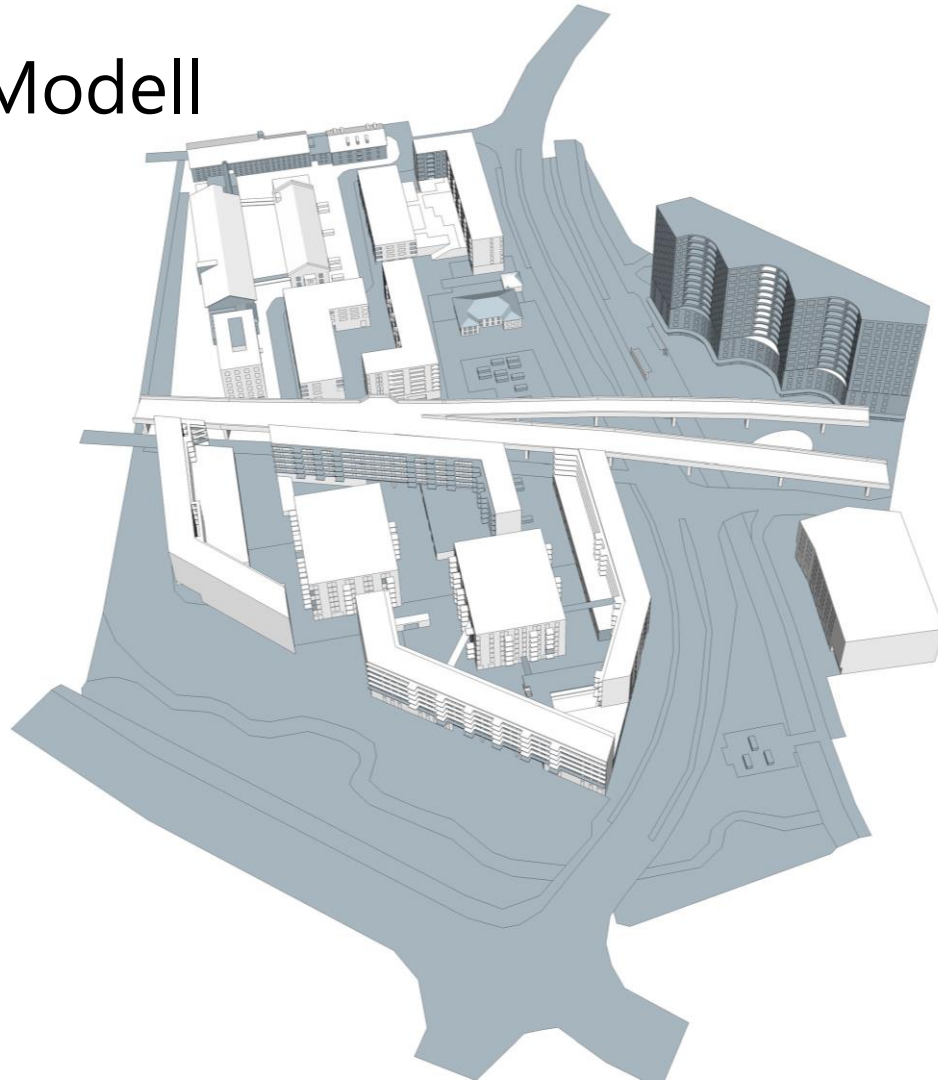
Modèle	Nombre Positions Sources & récepteurs		Nombre Chemins de transmission	
	4 étages	7 étages	4 étages	7 étages
R1	63	99	3'906	9'702
T	90	138	8'010	18'906
R2	94	142	8'742	20'022
R3	150	222	22'350	49'062
Z	140		19'460	
M	152		22'952	

Exemple de résultats (valeurs moyennes)

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



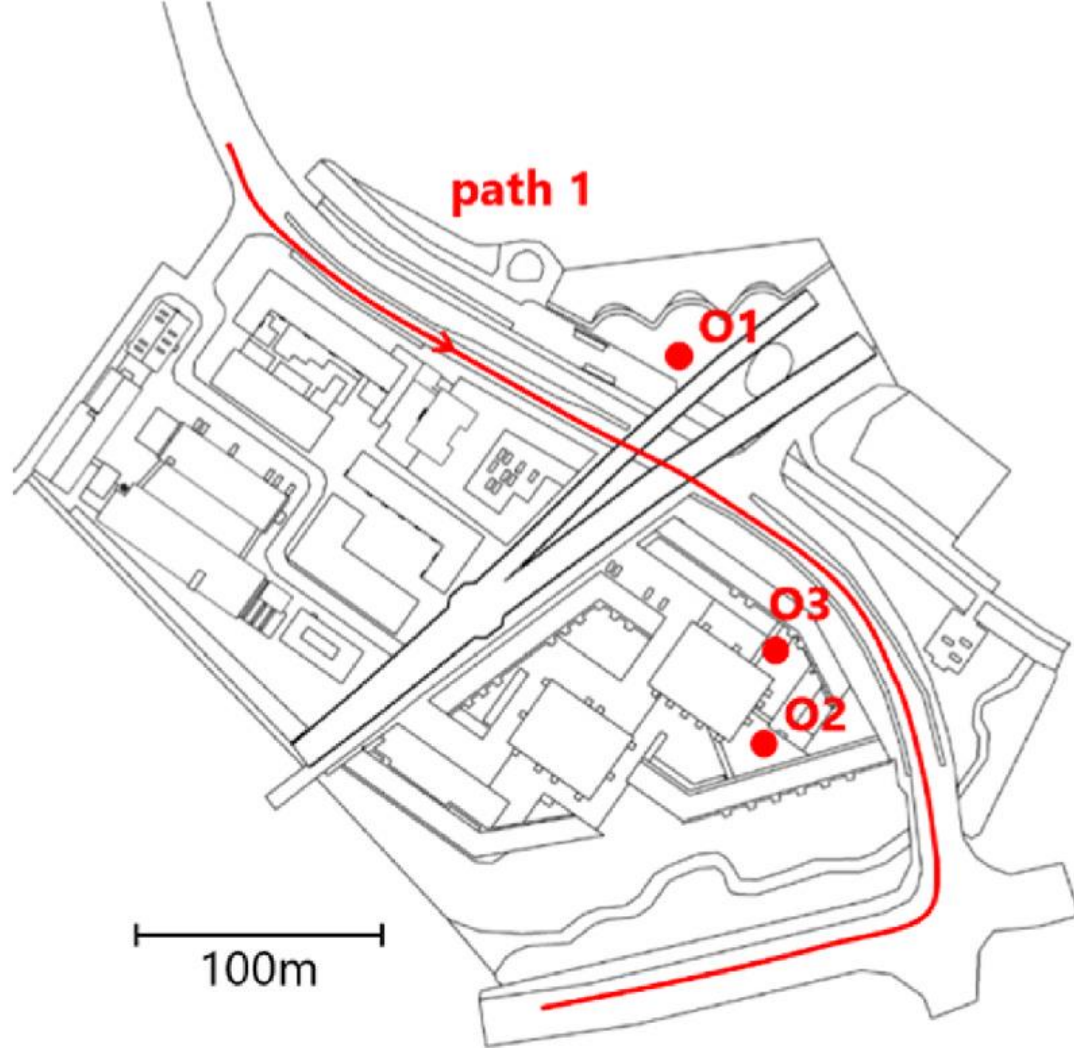
Sketch-Up Modell



Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023

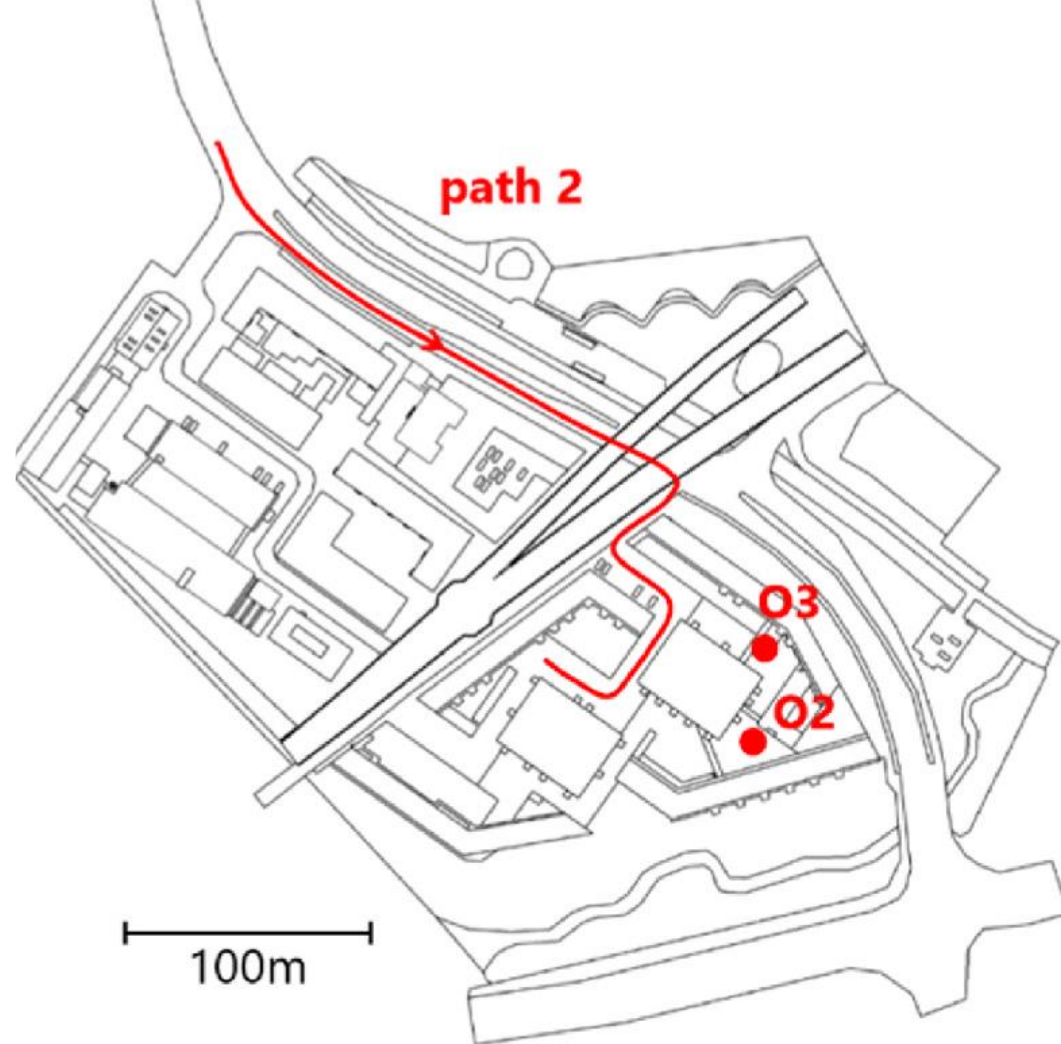
Scénarios

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



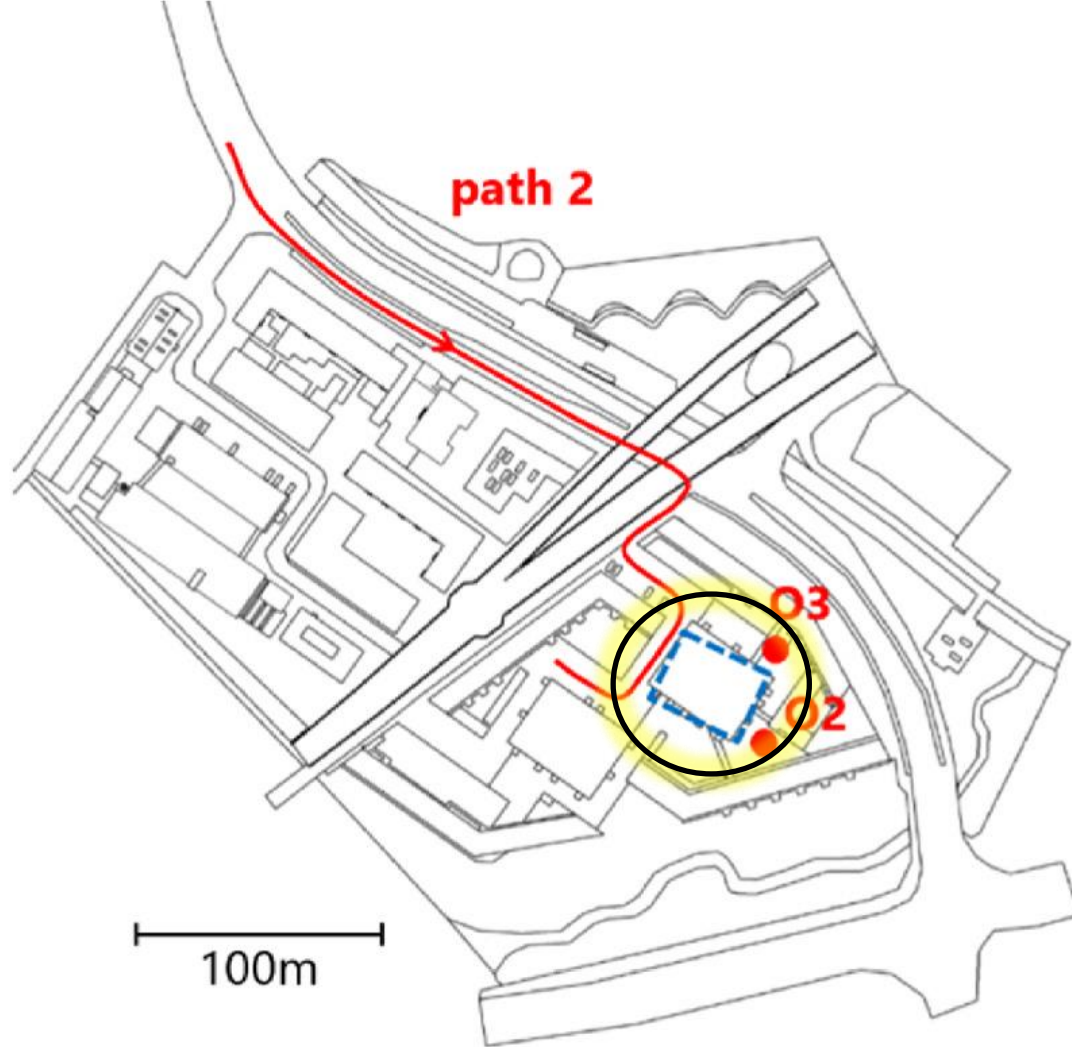
Scénarios

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



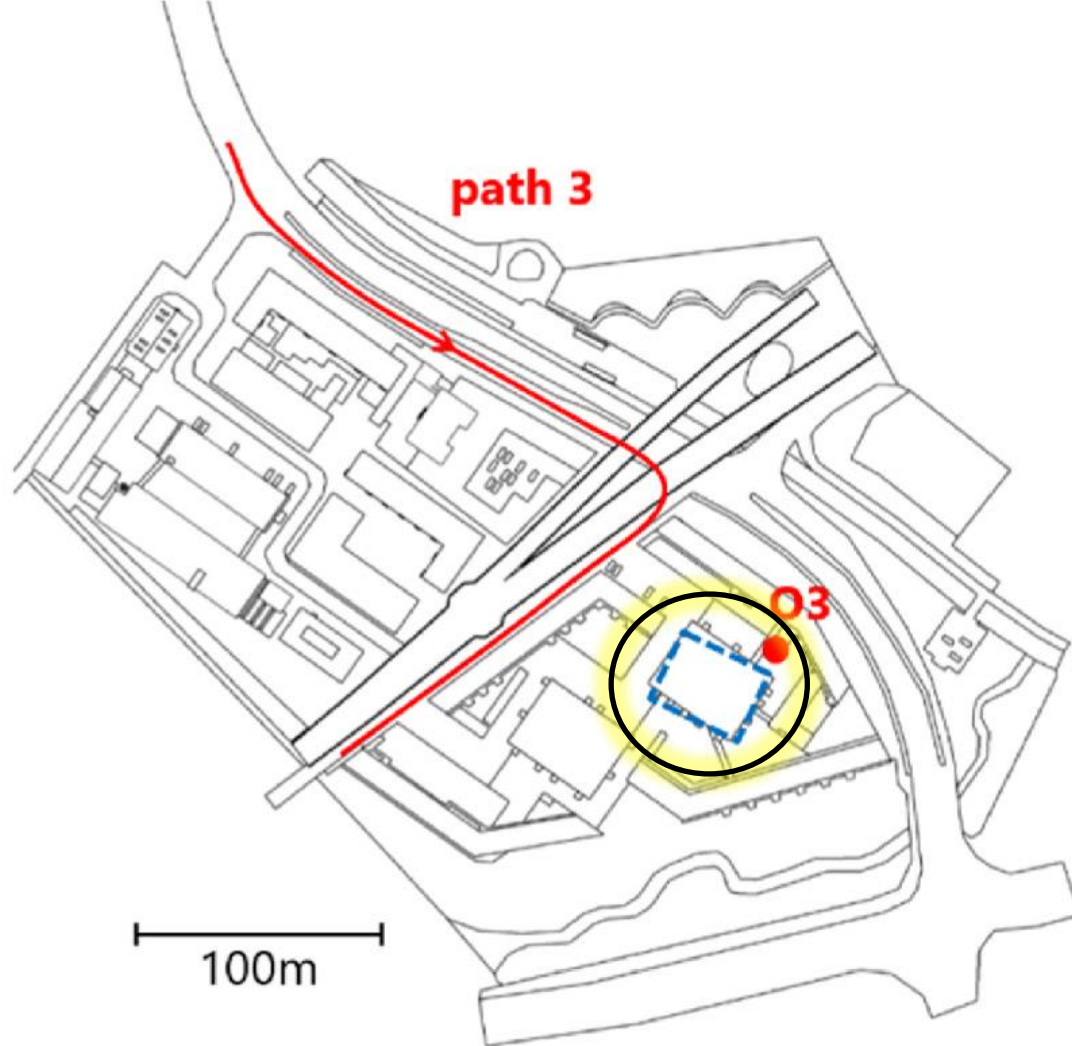
Scénarios

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



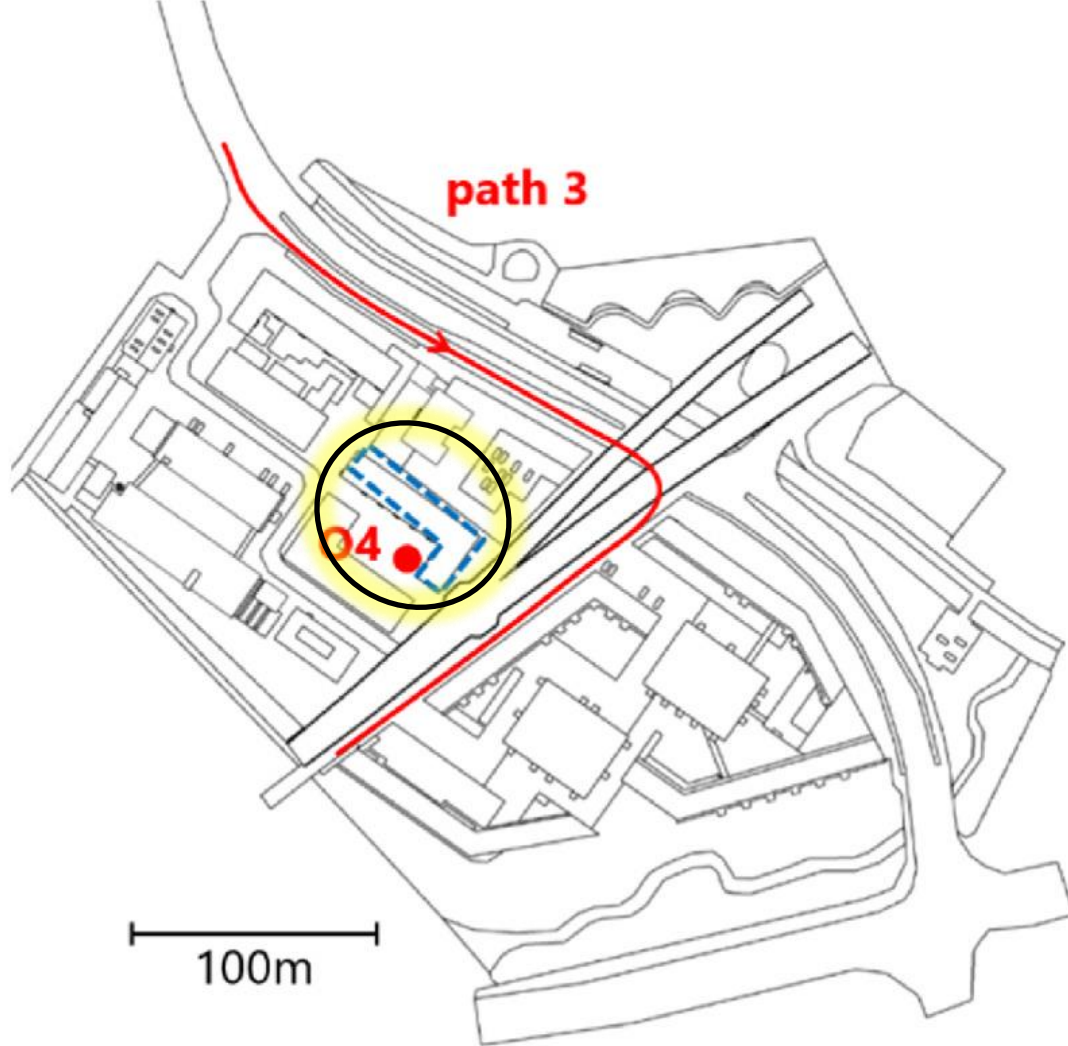
Scénarios

Kurt Eggenschwiler
Kurt Heutschi
SGA-SSA 2023



Scénarios

jenschwiler
Heutschi
ISA 2023



- Badino et al: An Evaluation of Geometrical Room Acoustics Simulations in Outdoor Settings. Forum Acusticum Torino

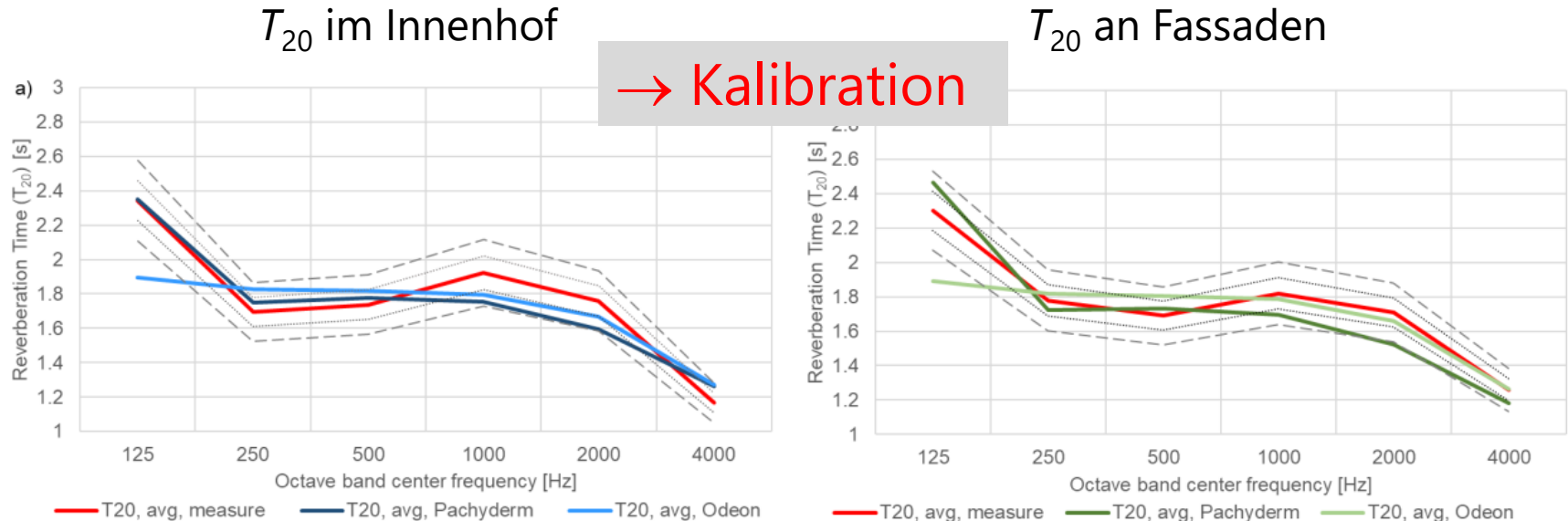


Table 1. Evaluation of the overall SPL difference found between measurement and simulations

	<i>SPL</i> difference [dB]							MAE façade [dB]	MAE courtyard [dB]
	F1	F2	F3	G1	G5	G8	G9		
Pachyderm	0.1	0.3	0.5	1.6	1.5	1.9	1.8	0.3	1.7
Odeon	0.4	0.6	0.1	1.4	1.3	1.5	1.6	0.4	1.5

MAE = Mean absolut Error

... good agreement ...