

Grado en Tecnologías Industriales

Trabajo de Fin de Grado

ESTUDIO DE LAS ESTRATEGIAS TÉRMICAS DE IMPLANTACIÓN DE MATERIALES A BASE DE TIERRA CRUDA EN LA VIVIENDA

Autor
Ángela Bellido Ferrero

Tutor
Céline HARTWEG-HELBERT

Madrid
Mayo 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Estudio de las estrategias térmicas de implantación de materiales a base de tierra cruda en la vivienda

en la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 20*24/25*, es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente, y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Ángela Bellido Ferrero **Fecha:** 08/ 05/ 2025



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Celine Hartweg-Helbert **Fecha:** 07/ 05/ 2025





Grado en Tecnologías Industriales

Trabajo de Fin de Grado

ESTUDIO DE LAS ESTRATEGIAS TÉRMICAS DE IMPLANTACIÓN DE MATERIALES A BASE DE TIERRA CRUDA EN LA VIVIENDA

Autor
Ángela Bellido Ferrero

Tutor
Céline HARTWEG-HELBERT

Madrid
Mayo 2025

ESTUDIO DE LAS ESTRATEGIAS TÉRMICAS DE IMPLANTACIÓN DE MATERIALES A BASE DE TIERRA CRUDA EN LA VIVIENDA

Autor: Bellido Ferrero, Ángela.

Director: Hartweg-Helbert, Céline.

Entidad Colaboradora: amàco

RESUMEN DEL PROYECTO

Este Trabajo de Fin de Grado, realizado en Centrale Lyon en colaboración con amàco, se centra en el estudio de estrategias térmicas para la incorporación de materiales a base de tierra cruda en la construcción de viviendas. En un contexto de transición ecológica y búsqueda de soluciones constructivas sostenibles, el objetivo fue evaluar el rendimiento térmico de dichos materiales e identificar las condiciones óptimas para su implementación.

Introducción

Desde hace un siglo, las necesidades en cuanto a confort térmico han evolucionado considerablemente. Hoy en día, se busca mantener una temperatura agradable en el interior de nuestras viviendas, lo que ha provocado un uso creciente de la calefacción en invierno y del aire acondicionado en verano. Sin embargo, esta mayor exigencia de confort conlleva una problemática energética importante.

La más reciente RE2020, normativa francesa para la construcción de edificios, busca mejorar la eficiencia energética, reducir las emisiones de carbono y garantizar el confort térmico.

Es en este contexto que la tierra cruda se presenta como una solución adaptada a los desafíos contemporáneos. Este material de bajo carbono ofrece numerosas ventajas:

- un impacto ambiental reducido gracias a un proceso de fabricación que requiere poca energía y genera pocas emisiones de gases de efecto invernadero;
- propiedades térmicas interesantes: usada sola, proporciona una gran inercia térmica; combinada con fibras, puede ofrecer capacidades aislantes;
- un potencial de mejora del confort térmico durante todo el año, contribuyendo a reducir las necesidades de calefacción en invierno y a limitar, e incluso eliminar, el uso del aire acondicionado en verano.

Problemática

Actualmente, no existe documentación ni estudios que indiquen qué estrategias adoptar al utilizar materiales a base de tierra cruda.

Este proyecto tiene como objetivo explorar las propiedades térmicas de distintos materiales mediante simulaciones dinámicas aplicadas a un volumen simple. El propósito es analizar el impacto de diferentes configuraciones de capas en los muros sobre el consumo energético y el confort térmico del edificio.

Estado de la técnica

Para definir estrategias térmicas óptimas, es esencial comprender la transferencia de calor y la inercia térmica de los materiales.

En este contexto, los materiales a base de tierra cruda presentan un gran potencial por su capacidad para regular la temperatura interior. Su comportamiento térmico depende de las técnicas de fabricación utilizadas y de su implementación en el edificio.

Evaluar estas propiedades requiere el uso de simulaciones térmicas dinámicas, que permiten optimizar las soluciones constructivas.

Esta sección analiza estos aspectos para entender mejor los desafíos y beneficios del uso de la tierra cruda en la construcción.

Transferencias térmicas

Son los mecanismos mediante los cuales el calor se intercambia entre medios con diferente temperatura, buscando siempre alcanzar un equilibrio térmico. Los tres principales son: la conducción, la convección y la radiación.

Inercia térmica

La inercia térmica es la capacidad de un material para almacenar y liberar calor con retraso, ayudando así estabilizar la temperatura interior de los edificios.

Depende de la densidad y la capacidad calorífica del material: cuanto mayor sea su masa y capacidad calorífica, más calor puede absorber sin cambios bruscos de temperatura.

En la edificación, esto mejora el confort térmico y reduce el consumo energético. La tierra cruda tiene una alta inercia térmica, por lo que absorbe, almacena y devuelve lentamente el calor, con el fin de regular de forma natural la temperatura interior.

La siguiente figura muestra un retraso de varias horas de la curva de temperatura interior (en verde) frente a la exterior (en naranja) debido a la inercia térmica. La atenuación de la curva de temperatura interior se debe al efecto de un aislante.

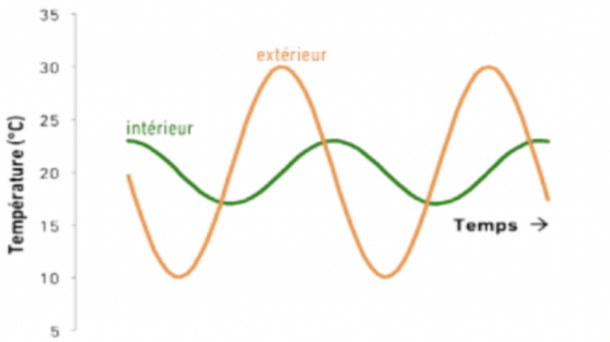


Figura 1: Evolución de las temperaturas interior y exterior: ilustración del desfase y de la amortiguación debidos a la inercia térmica de un edificio

Fuente: https://miao.ensad.fr/2018/08/21/les-proprietes-thermiques-2/

El **aislamiento térmico** es la capacidad de un material para limitar los intercambios de calor entre dos medios (por ejemplo, entre el interior y el exterior de un edificio).

También es importante definir la **difusividad térmica** que caracteriza la velocidad a la que el calor se propaga a través de un material cuando está sometido a una variación de temperatura y la **efusividad térmica** que expresa la capacidad de un material para intercambiar calor con su entorno.

Al seleccionar materiales para la construcción, es crucial encontrar un equilibrio entre sus propiedades térmicas. Para lograr una alta inercia térmica, se requiere una baja difusividad (que ralentiza el paso del calor) y una baja efusividad (que limita los intercambios rápidos con el aire), lo que favorece un confort térmico duradero. [**2**].

Confort térmico

Es una noción subjetiva que refleja la satisfacción de un individuo con respecto al entorno térmico en el que se encuentra. Depende de parámetros ambientales (la temperatura del aire, temperatura de las superficies...) y de parámetros relacionados con los ocupantes (actividad física, vestimenta...).

Para cuantificar el confort térmico en un edificio, se utilizan varios indicadores, entre ellos el PMV, el PPD y el grado de horas de incomodidad.

El **grado de horas de incomodidad (DH)** mide la incomodidad térmica en edificios sin calefacción ni climatización, integrando la diferencia entre la temperatura interior y un rango de confort, hora por hora.

Un DH alto indica mayor riesgo de disconfort, siendo útil para detectar sobrecalentamiento y comparar soluciones como aislamiento o ventilación. Aunque es fácil de calcular, su precisión es limitada, por lo que se prefieren indicadores más completos como el PMV o el PPD para análisis detallados.

El **PMV (Predicted Mean Vote)** es un índice que mide la sensación térmica media de un grupo de personas en un ambiente determinado, en una escala de -3 (frío) a +3 (calor), donde 0 indica confort térmico. Su cálculo considera tanto las condiciones ambientales como las características de los ocupantes. [**12**].

El **PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)** es un índice derivado del PMV que indica el porcentaje de personas que se sienten incómodas térmicamente en un espacio. Por ejemplo, un PPD del 10 % significa que el 10 % de los ocupantes tienen molestias por frío o calor. [**12**].

Estrategias para el confort térmico

En **invierno**, el objetivo es maximizar la captación solar y minimizar las pérdidas térmicas. Para ello: [**3**].

- Una orientación adecuada de las ventanas para maximizar la captación de energía solar.
- Utilizar materiales con alta inercia térmica para almacenar el calor durante el día y liberarlo por la noche.
- Implementar un buen aislamiento térmico para conservar el calor en el interior del edificio.

En **verano**, se busca evitar el sobrecalentamiento y mantener el interior fresco sin necesidad de climatización intensiva:

- Limitar las ganancias solares mediante protecciones.
- Utilizar materiales con alta inercia térmica para retardar la transmisión del calor al interior del edificio.

– Optimizar el aislamiento de las paredes para reducir los intercambios térmicos.

– Favorecer la disipación del calor acumulado con ventilación.

Características de la tierra cruda para la construcción

En la construcción con tierra cruda, se distinguen dos grandes categorías de materiales según su función y capacidad para estructurar el edificio [**1**]:

Materiales Masivos (Soportantes):
Son capaces de crear muros y soportar cargas, destacándose por su alta inercia térmica. Se utilizan para construir muros tanto exteriores como interiores soportantes. Algunos ejemplos son: Bauge, Tapia, Adobe o BTC.

Materiales de Acabado
Sirven para protección, regulación higrométrica y mejora estética. Se usan principalmente como revestimiento para proteger los muros masivos y regular la humedad, contribuyendo a la durabilidad y confort del edificio. Como el revestimiento de Tierra Cruda o el Tapial.

Tierra Aligerada
Es una mezcla de tierra y materiales ligeros (como paja, cáñamo o serrín), que se emplea para rellenar estructuras de madera o complementar muros soportantes de tapia, BTC o adobe. Mejora el aislamiento térmico, reduce el peso de las paredes y mantiene la transpirabilidad.



Figura 2: Construcción del muro de pisé en el chai Château Cantenac Brown

Fuente: https://amaco.org/un-nouveau-chai-en-terre-crue-zero-ciment-du-chateau-cantenac-brown/

Software de Simulación Térmica Dinámica

Se utilizaron dos programas principales para realizar la simulación térmica dinámica (STD), una técnica de modelado que permite analizar el comportamiento térmico de un

edificio considerando materiales, disposición espacial, sistemas de climatización y condiciones climáticas externas.

Pléiades

- Permite simular hora a hora el comportamiento térmico de los edificios según condiciones exteriores e interiores.
- Integra ocupación, sistemas de climatización y estrategias de gestión de aberturas y protecciones solares.
- Estima consumo energético y confort térmico mediante indicadores PMV (Predicted Mean Vote) y PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied).
- Evalúa también el nivel de humedad, aunque pierde precisión en muros transpirables como los de tierra cruda.

KoZiBu

- Software gratuito y completo, desarrollado por Jean Noël, similar a Pléiades.
- Permite definir detalladamente condiciones de ventilación, calefacción, ocupación y obtener temperaturas de superficie de los muros (no disponible en Pléiades).
- Dispone de versión beta con análisis de confort térmico (PMV y PPD).
- Usa scripts en archivos .txt para definir estudios, facilitando variaciones sistemáticas y simulaciones múltiples.

Metodología

Para este proyecto se realizaron simulaciones térmicas dinámicas con el objetivo de analizar el impacto de diversos parámetros sobre el confort térmico, la temperatura interior y el consumo energético.

El volumen modelado fue una habitación única de 100 m^2 y 2.5 m de altura, con una distribución fija de ventanas en las cuatro fachadas y un escenario de ventilación basado en casos reales. La composición del suelo y del techo se mantuvo constante en todas las simulaciones.

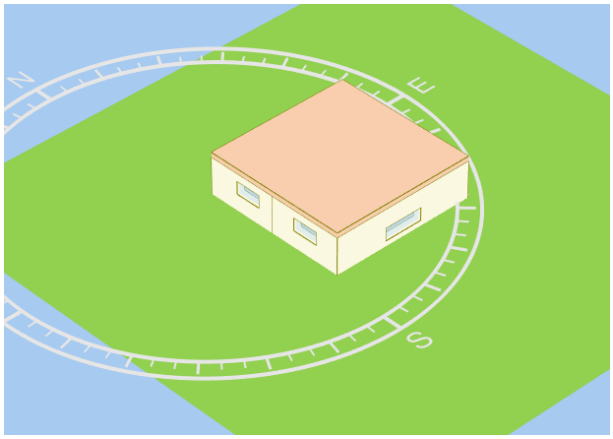


Figura 3: Modelo 3D del edificio en Pléiades

Elaboración propia

Para contextualizar las simulaciones en un entorno real, se estudió el mapa climático de Francia, que presenta cuatro tipos de clima según la región: mediterráneo, oceánico, continental y de montaña.



Figura 4: Mapa de Francia con sus diferentes climas

Fuente: https://www.kartable.fr/ressources/geographie/cours/le-climat/48659

Finalmente, se decidió trabajar con dos ubicaciones representativas: Ajaccio (clima mediterráneo) y Rennes (clima oceánico). La elección se basó en la disponibilidad de datos meteorológicos en los software de simulación térmica dinámica (STD).

El estudio se dividió en 2 fases:

- **Fase 1:** Análisis de la habitación vacía, sin ocupantes y sin sistemas de calefacción o aire acondicionado. El objetivo es identificar las mejores estrategias de aislamiento e inercia térmica, observando la evolución de la temperatura interior.

- **Fase 2:** Evaluación del volumen habitado por una familia de 4 personas (2 adultos y 2 niños). Se analiza el confort térmico mediante los indicadores PPD y PMV, así como el consumo energético del edificio.

Para la metodología en cada fase se utilizaron dos enfoques complementarios:

1. **Estudio de configuraciones particulares:** Se analizaron casos específicos y extremos con el objetivo de evidenciar tendencias térmicas y obtener primeras conclusiones sobre el comportamiento de los materiales. Estas configuraciones ilustran los límites y las variaciones posibles según las condiciones impuestas. En todos los casos, el material masivo utilizado fue la tapia, y el aislante térmico empleado fue lana de madera. Las configuraciones se evaluaron en los dos climas representativos: mediterráneo (Ajaccio) y oceánico (Rennes).

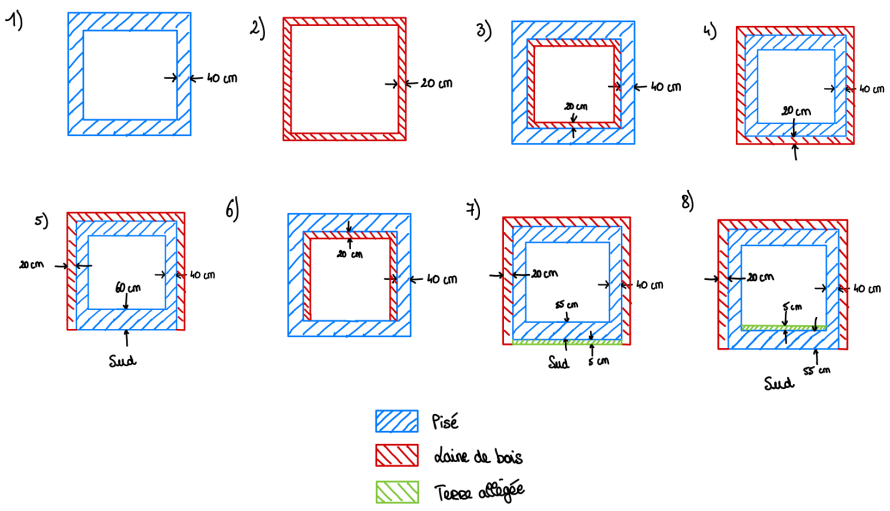


Figura 5: Esquema de las configuraciones particulares

Elaboración propia

Pisé → Tapia ("Tierra apisonada"), Laine en bois → Lana de madera, Terre allégée → Tierra aligerada (mezcla de tierra con materiales ligeros como fibras vegetales)

La correspondencia entre las configuraciones y su nombre se da en la tabla 1 a continuación.

Número	Nombre
1	Inercia
2	Aislante
3	Aislamiento interior
4	Aislamiento exterior
5	Aislamiento exterior y muro sur sin aislar
6	Aislamiento interior y muro sur sin aislar
7	Corrector exterior
8	Corrector interior

Tabla 1: Correspondencia nombre/número de las configuraciones

Elaboración propia

2. **Plan de experiencia:** Dado el alto número de parámetros involucrados (como el grosor de capas, tipo y ubicación de aislante), un enfoque exhaustivo resultaría en un número de simulaciones inmanejable. Por ello, se optó por utilizar un plan de experiencia, que permite reducir significativamente la cantidad de simulaciones al tiempo que revela la influencia individual de cada parámetro y sus interacciones, mediante un análisis estadístico.

   Un plan de experiencia es una serie estructurada de simulaciones donde se varían sistemáticamente los valores de ciertos parámetros dentro intervalos definidos, manteniendo otros constantes. En este estudio se empleó el plan Latin Hypercube 50,

generado con el software Ellistat, que permite cubrir eficientemente el espacio de combinaciones posibles y obtener resultados más completos que con simulaciones aleatorias.

El objetivo es construir un modelo matemático (mediante regresiones lineales) que relacione variables de entrada (como propiedades térmicas y espesores) con las salidas de interés (como temperatura interior, confort térmico o consumo energético). Se verifica la validez del modelo comparando los resultados simulados con los estimados.

Se eligen parámetros físicos como capacidad térmica, conductividad térmica, densidad, y espesores del material masivo y del aislante. No se eligen los materiales específicos como parámetros, ya que mezclar datos cualitativos y cuantitativos complica el análisis e introduce inconsistencias.

El número de simulaciones se determinó con el índice D-Optimal, que mide la calidad estadística del plan. Se elige el punto donde este índice alcanza una meseta, garantizando una buena relación entre precisión y número de simulaciones. Para evitar el sobreajuste, se considera un mínimo de simulaciones basado en el número de parámetros k, siguiendo la fórmula $1 + k + \frac{k*(k+1)}{2}$, que da un mínimo de 45 simulaciones para 8 parámetros. [**6**]

Resultados

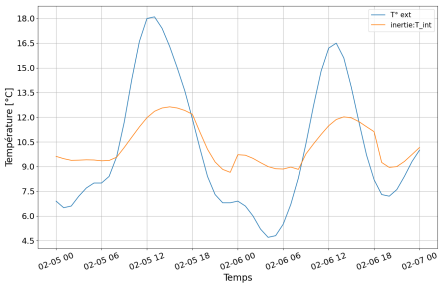
Esta sección réune los resultados de las simulaciones realizadas con los programas Pléiades y Kozibu en el caso de las configuraciones particulares y del plan de experiencia.

Fase 1: Habitación vacía

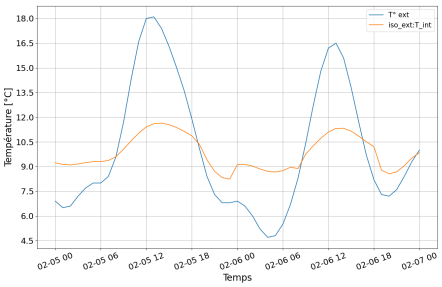
En esta primera fase, el volumen estudiado no cuenta con dispositivos de calefacción o climatización y no está habitado. Las magnitudes de interés, es decir, los valores de salida de las simulaciones numéricas, son la temperatura interior del edificio, la de sus muros y los índices PMV/PPD.

Se realizan las sumualciones para Ajaccio y para Rennes y se identifican dos puntos de análisis:

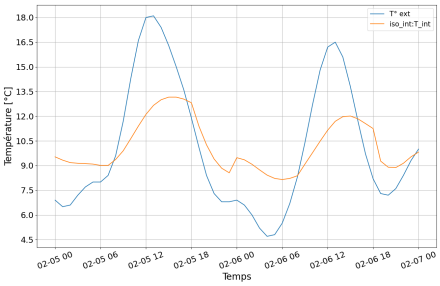
1. **Desfase térmico y temperatura interior:** Se traza la evolución de la temperatura interior y exterior durante 2 días en el mes de febrero en Ajaccio para las siguientes configuraciones:



(a) Inercia (configuración 1)



(b) Aislamiento exterior (4)



(c) Aislamiento interior (3)

Figura 6: Comparación del desfase en el mes de febrero en Ajaccio

Elaboración propia

En la figura 16 se observa que la primera configuración tiene un desfase temporal de 3 horas. Esto ilustra las propiedades de inercia de los materiales de tierra cruda como la tapia. El aislamiento exterior (conf. 4) anula las propiedades de inercia del material masivo, mientras que el aislamiento interior (conf.3) permite conservarlas; se observa nuevamente un desfase de 3 horas.

En Pléiades obtenemos la tabla 7 del desfase y la diferencia de temperatura para Rennes.

Configuración (número)	**Desfase (h)**	**Diferencia de T (°C)**
Inercia (1)	2,69	−0,37
Aislante (2)	2,69	2,65
Aislamiento int. (3)	2,31	3,81
Aislamiento ext. (4)	2,39	−0,79
Aislamiento ext., muro sur sin aislar (5)	2,38	−0,58
Aislamiento int., muro sur sin aislar (6)	2,20	−0,97
Corrector ext. (7)	2,37	−1,67
Corrector int. (8)	2,31	−1,56

Tabla 2: Desfase y diferencia de temperatura para cada configuración (Rennes) con Pléiades

Elaboración propia

El desfase no varía significativamente entre las diferentes configuraciones.

En cuanto a la diferencia de temperaturas (que corresponde al promedio anual de $T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}$, es decir, las temperaturas máximas diarias en el interior y exterior

del edificio), se encuentran configuraciones con promedio positivo (configuraciones con aislamiento interior o completamente aisladas) y otras con promedio negativo. Las configuraciones con diferencia negativa son mas adecuadas para climas cálidos, permitiendo mantener una temperatura interior más baja que la exterior. Así, las más eficaces parecen ser las configuraciones con corrector térmico.

2. **Confort thermique**

A partir del enfoque estadístico, se identificaron los parámetros que influyen en el confort térmico y aquellos cuyo impacto es marginal. Se realizaron 50 simulaciones térmicas dinámicas en el volumen vacío y se concluyó que los parámetros más importantes son:

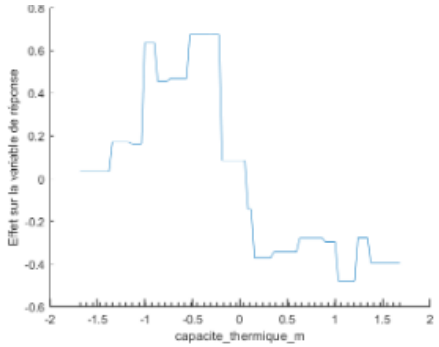
- el espesor del material de construcción,
- la capacidad térmica másica del material,
- el espesor de la capa aislante.

Para lograr un buen confort térmico, se deben respetar los siguientes criterios:

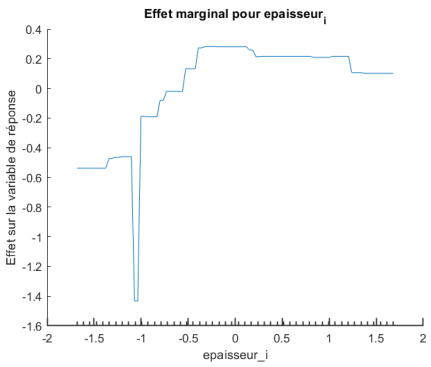
- Espesor del material de construcción mayor a 30 cm
- Capacidad térmica másica superior a 1350 J/kg·K
- Espesor del aislante inferior a 15 cm

El estudio detecta un efecto negativo del aislante, ya que cuanto más gruesa es la capa, menor es el confort térmico. El aislante actúa como una barrera contra las variaciones rápidas de temperatura, lo que, en este caso, tiende a prolongar las condiciones térmicas incómodas en el interior. Por tanto, se recomienda no superar los 15 cm de espesor de aislante, que es el límite inferior evaluado en el estudio.

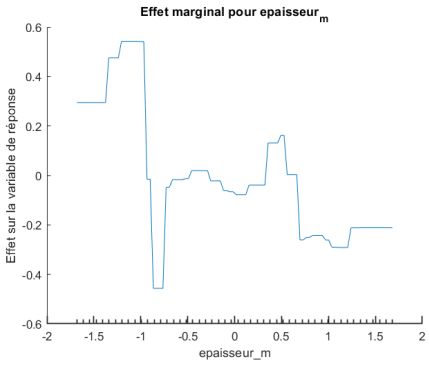
Aun así, se confirman algunos resultados clásicos: al aumentar el espesor del material de construcción, se incrementa el desfase térmico, lo que permite desplazar los picos de temperatura y así mejorar el confort. Además, una alta capacidad térmica permite al muro almacenar más calor, lo que favorece este efecto de desfase térmico.



(a) Capacidad térmica másica del material



(b) Espesor del aislante



(c) Espesor del material

Figura 7: Evolución del grado de incomodidad en función de los parámetros significativos

Elaboración propia

Las figuras 17 muestran la evolución del grado-hora de incomodidad según estos parámetros significativos. Como los resultados están normalizados, se representan tendencias, no valores absolutos: un valor alto indica incomodidad térmica, y uno bajo, confort.

Fase 2: Habitación ocupada

En esta fase se simuló el mismo volumen con sistemas de calefacción, climatización y la presencia de una familia de cuatro personas. Se fijaron temperaturas de consigna de 18°C en invierno y 26°C en verano. Las magnitudes analizadas fueron el consumo energético y los indicadores de confort térmico.

En KoZiBu se implementó un escenario de ocupación representativo de una familia, donde se modeló su presencia diaria: ausentes de lunes a viernes desde las 9h, con la vuelta a la vivienda de los 2 niños a las 16h y de los 2 adultos a las 18h; los fines de semana permanecen en casa todo el día.

Consumición energética para una potencia fija a $10kW$

Se simulan las 8 configuraciones particulares para Ajaccio y Rennes y los resultados se muestran en las siguientes tablas:

Configuración	Consumo calefacción [kWh]	Cons. aire acondicionado [kWh]	Consumo total [kWh]
Inercia (1)	13,357	39	13,396
Aislante (2)	9750	89	9839
Aislamiento int. (3)	9534	65	9599
Aislamiento ext. (4)	9197	16	9213
Aislamiento ext. + muro sur no aislado (5)	10,295	27	10,322
Aislamiento int. + muro sur no aislado (6)	10,231	27	10,258
Corrector exterior (7)	9599	14	9613

Tabla 3: Consumo de las configuraciones particulares — celda habitada en Ajaccio con KoZiBu

Elaboración propia

Configuración	Consumo calefacción [kWh]	Cons. aire acondicionado [kWh]	Consumo total [kWh]
Inercia (1)	23,316	0	23,316
Aislante (2)	16,794	6	16,800
Aislamiento int. (3)	16,498	3	16,501
Aislamiento ext. (4)	16,121	0	16,121
Aislamiento ext. + muro sur no aislado (5)	17,834	0	17,834
Aislamiento int. + muro sur no aislado (6)	17,677	0	17,677
Tierra aligerada (7)	16,934	0	16,934

Tabla 4: Consumo de las configuraciones particulares — celda habitada en Rennes con KoZiBu

Elaboración propia

El consumo energético es, en general, más alto en Rennes que en Ajaccio, lo cual se explica por el clima más suave de Ajaccio, que requiere menos calefacción.

Entre las distintas configuraciones probadas, la configuración 1, Inercia, resulta ser la menos eficiente.

Algunas configuraciones destacan por sus buenos resultados:

- El aislamiento exterior e interior ofrecen el mejor rendimiento.

- Una configuración alternativa, en la que el muro sur no está aislado pero cuenta con un corrector térmico, también muestra buenos resultados, con un consumo solo aproximadamente un 4 % mayor que las configuraciones más eficientes.

Al analizar por separado el consumo de calefacción y climatización, se evidencia que cada clima requiere diferentes prioridades en cuanto a estrategias de eficiencia energética.

En Rennes, casi no se necesita climatización; el desafío principal es mantener el confort térmico en invierno (estrategia enfocada en el calor).

En Ajaccio, aunque hay algo de climatización, sigue siendo mucho menor que el uso de calefacción, por lo que mejorar el confort en verano (estrategia enfocada en el frío) también es relevante.

Siguiendo el método estadístico y analizando los p_{values}, las variables significativas son: la densidad del material, la capacidad térmica del material, la conductividad térmica del material, el espesor del material, la densidad del aislante, la conductividad térmica del aislante, el espesor del aislante.

Se va a detallar el caso del espesor del aislante.

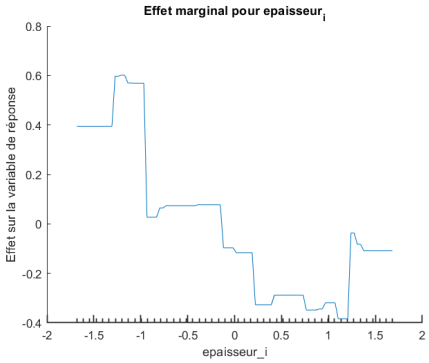


Figura 8: Influencia del espesor del aislante sobre el consumo

Elaboración propia

La figura 18 muestra la evolución del consumo en función del espesor de la capa aislante, elegido entre 15 y 30 cm. Se observa que el consumo energético disminuye notablemente al aumentar el espesor del aislante hasta un límite de 18 cm, alcanzando una reducción significativa. Aumentar el espesor hasta 23 cm permite una mejora adicional, pero más allá de ese punto, el beneficio en términos de consumo se vuelve marginal.

Confort térmico

Se definen dos magnitudes: la suma en valor absoluto del PMV y el número de horas en las que el PPD es superior al 10 %. Así, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 10.

Configuración	Ajaccio			Rennes		
	Suma PMV en valor absoluto	Número de horas PPD > 10 %	DH	Suma PMV en valor absoluto	Número de horas PPD > 10 %	DH
Inercia (1)	3660	8275	.	4999	8681	.
Aislante (2)	3395	8270	.	4307	8585	.
Aislamiento interior (3)	3353	8269	.	4384	8623	.
Aislamiento exterior (4)	3258	8162	.	4578	8733	.
Aislamiento ext. + muro sur sin aislar (5)	3307	8240	.	4514	8687	.
Aislamiento int. + muro sur sin aislar (6)	3317	8243	.	4580	8695	.
Corrector exterior (7)	3301	8166	.	4666	8733	.

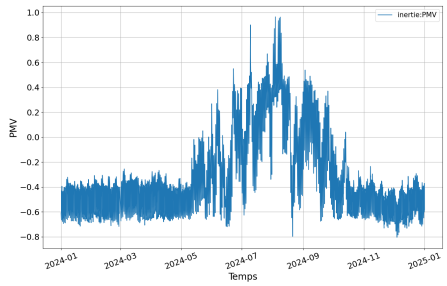
Tabla 5: Resumen de los indicadores de confort térmico para Ajaccio y Rennes en KoZiBu

Elaboración propia

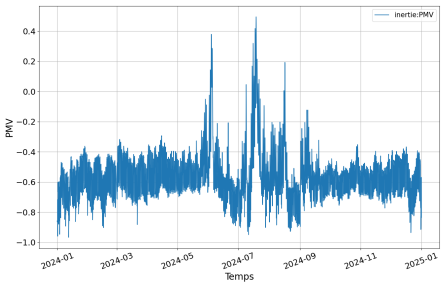
En ambas ciudades y para todas las configuraciones, el número de horas con un PPD superior al 10 % es muy elevado, indicando disconfort térmico persistente. Esto se atribuye a la temperatura de consigna baja para calefacción (18°C).

En términos de PMV, tanto en Ajaccio como en Rennes la configuración Inercia resulta la menos favorable.

La evolución de los índices PPD y PMV en Ajaccio y Rennes se muestra en las figuras 19 y 20.



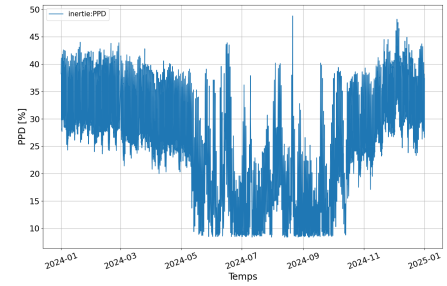
(a) PMV Inercia (configuración 1) Ajaccio



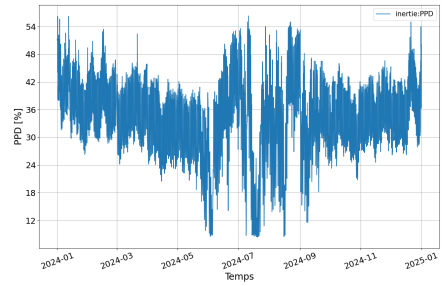
(b) PMV Inercia (configuración 1) Rennes

Figura 9: Comparación de los índices PMV durante el año

Elaboración propia



(a) PPD Inercia (configuración 1) Ajaccio



(b) PPD Inercia (configuración 1) Rennes

Figura 10: Comparación de los índices PPD durante el año

Elaboración propia

Se observa que durante la mayor parte del año el PMV es aproximadamente -0,5 tanto en Ajaccio como en Rennes, lo que indica una ligera sensación de frío. Durante el verano, la sensación térmica pasa a ser de calor, de manera más pronunciada en Ajaccio, lo cual es coherente. En las gráficas de PPD, se observa que, a pesar de la presencia de calefacción, al estar limitada en potencia, el edificio por sí solo no es capaz de garantizar un confort térmico satisfactorio durante todo el año.

El análisis estadístico realizado mediante el plan de experiencia permitió identificar los parámetros que influyen de manera significativa en el confort térmico en esta configuración. Estos parámetros y sus valores óptimos para maximizar dicho confort térmico son:

- La densidad del material de construcción superior a 1475 $\mathrm{kg\,m^{-3}}$,
- La capacidad térmica específica del material de construcción superior a 1250 $\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}}$,
- La conductividad térmica del material de construcción superior a 0,28 $\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$,
- El espesor del material de construcción superior a 35 cm — se observa una meseta a partir de este valor,
- El espesor del aislante superior a 20 cm — también se observa una meseta a partir de este valor.

Conclusiones

En el marco de este proyecto, realizado en colaboración con amàco, se exploró el potencial térmico de los materiales en tierra cruda en la construcción. Este trabajo se enmarca en un enfoque de transición ecológica, revaluando el interés de los materiales locales, poco transformados y sostenibles.

Tras un análisis de las propiedades térmicas de las diferentes tierras crudas y las técnicas constructivas asociadas, se utilizó la simulación térmica dinámica mediante los software Kozibu y Pléiades. Se probaron varias configuraciones de paredes, cruzando los datos mediante un plan de experiencia estadística para medir su influencia sobre el confort interior y el consumo energético.

Los resultados muestran que paredes gruesas, compuestas por materiales de alta densidad volumétrica y capacidad térmica, ofrecen un buen confort al regular las variaciones de temperatura. Una conductividad elevada también mejora este confort, pero puede aumentar la demanda energética. En cuanto al aislamiento, el grosor es determinante para el confort, mientras que una alta densidad ayuda a reducir el consumo. Sin embargo, ninguna de las configuraciones probadas cumple con los requisitos de la RE2020 en los climas estudiados.

Este proyecto permitió formarse en herramientas de simulación y análisis, además de sensibilizar sobre la importancia de los materiales biosostenibles en una lógica de construcción sostenible.

Palabras clave: Tierra cruda, Simulación térmica dinámica, Construcción sostenible, Inercia térmica, Eficiencia energética, Confort térmico.

Referencias

[1] Amàco: *Ressources amaco*. Disponible à : `https://ressources.amaco.org/`. Consulté le 8 Octobre 2024.

[2] Anger Romain, Cloquet Basile, Couvreur Lucile, Doat Patrice, Fontaine Laetitia, Moevus-Dorvaux Mariette: *Béton d'Argile environnemental*. Brochure, 2010-2013. Consulté le 15 Octobre 2024.

[3] Auger Bertrand, Charry Sébastien, Daufouy Jérôme, Dolmaire Claire, Garnier Matthieu, Le Deuff Maxime, Mryankov Hristo, Prud'homme Sébastien, Tavares Vanden Berghe Brícia, Venzal Vincent, Wolny Philippe: *AIA LE PISÉ: Mieux concevoir & construire en terre crue*. Guide pédagogique, Janvier 2023. Consulté le 15 Octobre 2024.

[4] Bioul Sophie: *Principes techniques généraux de conception architecturale en terre crue en Île-de-France*. Mémoire, Novembre 2020. Consulté le 12 Novembre 2024.

[5] Champiré Florient, Fabbri Antonin, Heitz Philippe, Meunier Nicolas, Morel Jean-Claude, Soudani Lucile: *L'isolation du pisé: pertinence et principes*. Août 2015. Consulté le 12 Novembre 2024.

[6] Chassaing Jean-Paul, Chauveau Jean-Claude: *Introduction à la méthode de plans d'expériences par la méthode Taguchi*. Consulté le 3 Décembre 2024.

[7] Girerd Manon: *L'isolation thermique des murs en pisé par l'extérieur avec des matériaux bio et/ou géo sourcés: état des lieux de la pratique professionnelle actuelle et analyse des solutions techniques*. Thèse, Février 2024. Disponible à : `https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04472910`. Consulté le 15 Octobre 2024.

[8] Girerd Monon, Ple Olivier, Prime Noémie: *Analyse bibliographique préliminaire à l'étude du Comportement multifonctionnel de Parois Complexes géo et bio-Sourcées (ANR PACS+)*. Thèse, Juin 2024. Disponible à : `https://hal.science/hal-04593633`. Consulté le 15 Octobre 2024.

[9] Ministère de la transition écologique: *Guide RE2020*. Janvier 2024. Consulté le 10 Décembre 2024.

[10] Moya Jean-Pierre: *Un mur massif doit-il être isolé? Le fonctionnement de la façade sud*. Dossier, mars 2019. Consulté le 15 Octobre 2024.

[11] LGCB-ENTPE: *L'isolation du pisé: pertinence et principes*. Août 2015. Consulté le 1 Avril 2025.

[12] Quadco' engineering: *Définition PMV/PPD*. Consulté le 4 Avril 2025.

OPTIMIZING THERMAL STRATEGIES WITH RAW EARTH MATERIALS FOR HOUSING

This Industrial Application Project, conducted at Centrale Lyon in collaboration with amàco, focuses on thermal strategies for implementing earth-based materials in housing. In the context of ecological transition and sustainable construction, the aim was to assess the thermal performance of these materials and identify optimal implementation conditions.

Introduction

For the past century, the requirements regarding thermal comfort have evolved considerably. Nowadays, the goal is to maintain a pleasant indoor temperature in our homes, which has led to an increasing use of heating in winter and air conditioning in summer. However, this higher demand for comfort entails a significant energy challenge.

The most recent RE2020, a French regulation for building construction, aims to improve energy efficiency, reduce carbon emissions, and ensure thermal comfort.

In this context, raw earth emerges as a suitable solution to contemporary challenges. This low-carbon material offers numerous advantages:

- a reduced environmental impact thanks to a manufacturing process that requires little energy and emits few greenhouse gases;
- interesting thermal properties: used alone, it provides high thermal inertia; combined with fibers, it can offer insulating capacities;
- a potential to improve thermal comfort throughout the year, helping reduce heating needs in winter and limit, or even eliminate, the use of air conditioning in summer.

Problem Statement

Currently, there is no documentation or studies indicating which strategies to adopt when using raw earth-based materials.

This project aims to explore the thermal properties of different materials through dynamic simulations applied to a simple volume. The goal is to analyze the impact of different wall layer configurations on energy consumption and thermal comfort in buildings.

State of the Art

To define optimal thermal strategies, it is essential to understand heat transfer and the thermal inertia of materials.

In this context, raw earth-based materials offer great potential due to their ability to regulate indoor temperature. Their thermal behavior depends on the manufacturing techniques used and their implementation in the building.

Assessing these properties requires the use of dynamic thermal simulations, which help optimize construction solutions.

This section analyzes these aspects to better understand the challenges and benefits of using raw earth in construction.

Heat Transfers

These are the mechanisms through which heat is exchanged between media with different temperatures, always seeking thermal equilibrium. The three main types are: conduction, convection, and radiation.

Thermal Inertia

Thermal inertia is the ability of a material to store and release heat with a delay, thereby helping to stabilize indoor temperatures.

It depends on the density and heat capacity of the material: the greater the mass and heat capacity, the more heat it can absorb without sudden temperature changes.

In buildings, this improves thermal comfort and reduces energy consumption. Raw earth has high thermal inertia, meaning it absorbs, stores, and slowly releases heat to naturally regulate indoor temperatures.

The following figure shows a delay of several hours between the indoor temperature curve (in green) and the outdoor temperature curve (in orange), due to the building's thermal inertia. The attenuation of the indoor temperature curve is due to the effect of insulation.

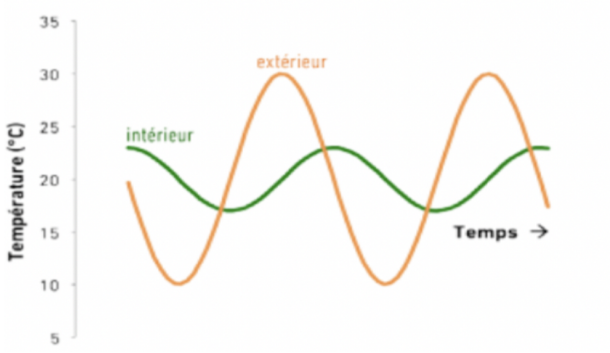


Figura 11: Evolution of indoor and outdoor temperatures: illustration of the time lag and attenuation caused by a building's thermal inertia

Source: https://miao.ensad.fr/2018/08/21/les-proprietes-thermiques-2/

Thermal insulation is the ability of a material to limit heat exchange between two environments (e.g., between the inside and outside of a building).

It is also important to define **thermal diffusivity**, which characterizes how quickly heat propagates through a material when subjected to a temperature change, and **thermal effusivity**, which expresses the capacity of a material to exchange heat with its surroundings.

When selecting construction materials, it is crucial to find a balance between their thermal properties. For high thermal inertia, low diffusivity (which slows down heat transfer) and low effusivity (which limits rapid exchange with air) are desirable, favoring long-lasting thermal comfort. [**2**].

Thermal Comfort

This is a subjective notion that reflects an individual's satisfaction with the thermal environment they are in. It depends on environmental parameters (air temperature,

surface temperatures...) and occupant-related parameters (physical activity, clothing...).

To quantify thermal comfort in a building, several indicators are used, including PMV, PPD, and the degree of discomfort hours.

The **Degree of Discomfort Hours (DH)** measures thermal discomfort in buildings without heating or cooling systems, by integrating the difference between indoor temperature and a comfort range, hour by hour.

A high DH indicates a greater risk of discomfort, making it useful for identifying overheating and comparing solutions like insulation or ventilation. Although easy to calculate, its precision is limited, so more comprehensive indicators like PMV or PPD are preferred for detailed analysis.

The **PMV (Predicted Mean Vote)** is an index that measures the average thermal sensation of a group of people in a given environment, on a scale from -3 (cold) to +3 (hot), where 0 indicates thermal comfort. Its calculation considers both environmental conditions and occupant characteristics. [**12**].

The **PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)** is an index derived from the PMV that indicates the percentage of people feeling thermally uncomfortable in a space. For example, a PPD of 10 % means that 10 % of occupants are dissatisfied due to feeling too hot or too cold. [**12**].

Thermal Comfort Strategies

In **winter**, the goal is to maximize solar gain and minimize thermal losses. For this purpose: [**3**].

- Proper window orientation to maximize solar energy gain.
- Use materials with high thermal inertia to store heat during the day and release it at night.
- Implement good thermal insulation to retain heat inside the building.

In **summer**, the aim is to prevent overheating and keep the interior cool without intensive air conditioning:

- Limit solar gains through shading.
- Use materials with high thermal inertia to delay heat transmission to the interior.
- Optimize wall insulation to reduce thermal exchange.
- Promote heat dissipation through ventilation.

Properties of Raw Earth for Construction

In raw earth construction, two major categories of materials are distinguished according to their function and their capacity to structure the building [**1**]:

Massive (Load-Bearing) Materials:

These can create walls and bear loads, and are characterized by their high thermal inertia. They are used for constructing both exterior and interior load-bearing walls. Examples include Cob, Rammed Earth, Adobe, or CEB (Compressed Earth Blocks).

Finishing Materials

Used for protection, hygrothermal regulation, and aesthetic enhancement. They are mainly used as coatings to protect massive walls and regulate humidity, contributing to durability and comfort. Examples include Earthen Plaster or Rammed Earth Cladding.

Lightened Earth

A mixture of earth and lightweight materials (such as straw, hemp, or sawdust), used to fill wooden structures or complement rammed earth, CEB, or adobe load-bearing walls. It improves thermal insulation, reduces wall weight, and maintains breathability.



Figura 12: Construction of a rammed earth wall at Château Cantenac Brown wine cellar

Source: https://amaco.org/un-nouveau-chai-en-terre-crue-zero-ciment-du-chateau-cantenac-brown/

Dynamic Thermal Simulation Software

Two main programs were used to carry out the dynamic thermal simulation (DTS), a modeling technique that analyzes a building's thermal behavior by considering materials, spatial layout, HVAC systems, and external weather conditions.

Pléiades

- Allows hour-by-hour simulation of building thermal behavior based on external and internal conditions.
- Integrates occupancy, HVAC systems, and strategies for managing openings and solar protection.
- Estimates energy consumption and thermal comfort using PMV (Predicted Mean Vote) and PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) indicators.

– Also evaluates humidity levels, although it loses accuracy with breathable walls such as those made of raw earth.

KoZiBu

– A free and comprehensive software developed by Jean Noël, similar to Pléiades.

– Allows detailed definition of ventilation, heating, and occupancy conditions, and provides surface temperature readings of walls (not available in Pléiades).

– Includes a beta version with thermal comfort analysis (PMV and PPD).

– Uses scripts in .txt files to define studies, facilitating systematic variations and multiple simulations.

Methodology

Dynamic thermal simulations were carried out for this project with the aim of analyzing the impact of various parameters on thermal comfort, indoor temperature, and energy consumption.

The modeled volume was a single room of 100 m^2 with a height of 2.5 m, featuring a fixed window distribution on all four façades and a ventilation scenario based on real-life cases. The composition of the floor and ceiling remained constant throughout all simulations.

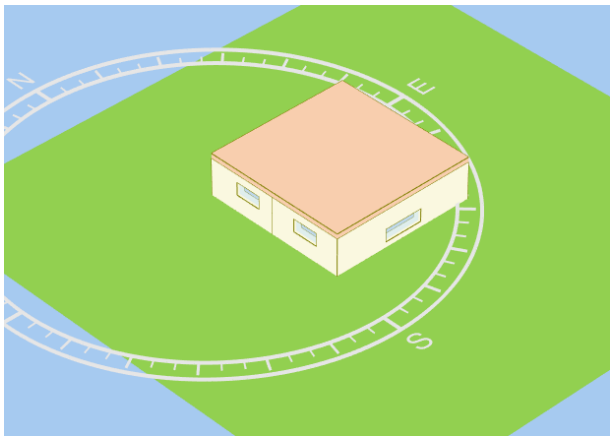


Figura 13: 3D model of the building in Pléiades

Own creation

To contextualize the simulations in a real environment, the climate map of France was studied, which presents four climate types according to the region: Mediterranean, oceanic, continental, and mountain.



Figura 14: Map of France with its different climate zones

Source: https://www.kartable.fr/ressources/geographie/cours/le-climat/48659

Finally, two representative locations were chosen: Ajaccio (Mediterranean climate) and Rennes (oceanic climate). The choice was based on the availability of meteorological data in the dynamic thermal simulation (DTS) software.

The study was divided into two phases:

– **Phase 1:** Analysis of the empty room, without occupants or heating/cooling systems. The objective was to identify the best strategies for insulation and thermal inertia, by observing the evolution of the indoor temperature.

– **Phase 2:** Evaluation of the space inhabited by a family of four (2 adults and 2 children). Thermal comfort was assessed using the PPD and PMV indicators, as well as the building's energy consumption.

For the methodology in each phase, two complementary approaches were used:

1. **Study of particular configurations:** Specific and extreme cases were analyzed to reveal thermal trends and obtain initial conclusions on the behavior of the materials. These configurations illustrate the limits and possible variations depending on the imposed conditions. In all cases, the massive material used was rammed earth, and the thermal insulator was wood wool. The configurations were evaluated in both representative climates: Mediterranean (Ajaccio) and oceanic (Rennes).

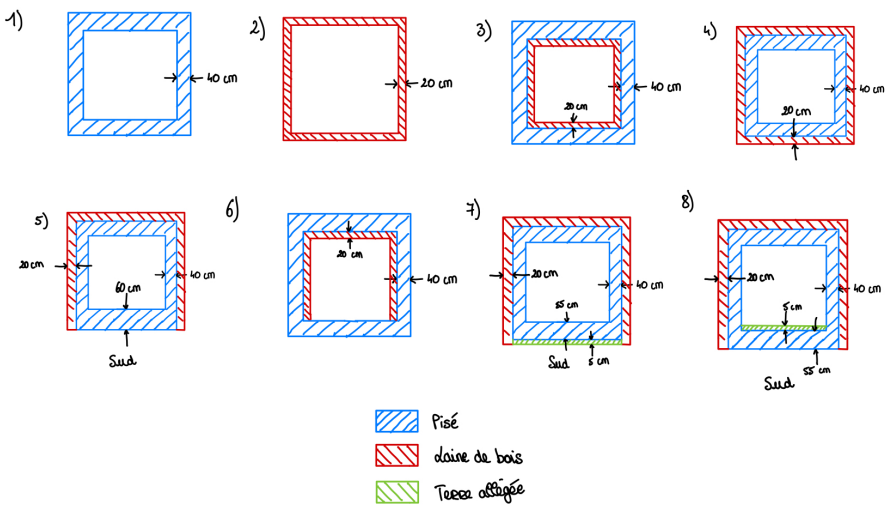


Figura 15: Diagram of the particular configurations

Own creation

Pisé → Rammed earth, Laine en bois → Wood wool, Terre allégée → Light earth (mixture of earth with light materials such as plant fibers)

The correspondence between the configurations and their names is given in Table 6 below.

Number	Name
1	Inertia
2	Insulating
3	Interior insulation
4	Exterior insulation
5	Exterior insulation and uninsulated south wall
6	Interior insulation and uninsulated south wall
7	Exterior corrector
8	Interior corrector

Tabla 6: Correspondence between name and number of the configurations

Own creation

2. **Design of experiments:** Given the high number of parameters involved (such as layer thickness, type and location of insulation), an exhaustive approach would result in an unmanageable number of simulations. Therefore, a design of experiments (DOE) approach was chosen, which significantly reduces the number of simulations while revealing the individual influence of each parameter and their interactions through statistical analysis.

   A design of experiments is a structured series of simulations where certain parameter values are systematically varied within defined intervals, while others are held constant. In this study, the Latin Hypercube 50 plan was used, generated with the

Ellistat software, allowing efficient coverage of the possible combination space and yielding more complete results than random simulations.

The objective is to construct a mathematical model (via linear regression) that relates input variables (such as thermal properties and thicknesses) to output variables of interest (such as indoor temperature, thermal comfort, or energy consumption). The model's validity is verified by comparing simulated results with estimated ones.

Physical parameters such as thermal capacity, thermal conductivity, density, and the thicknesses of the massive and insulating materials were selected. Specific materials were not chosen as parameters, since mixing qualitative and quantitative data complicates the analysis and introduces inconsistencies.

The number of simulations was determined using the D-Optimal index, which measures the statistical quality of the plan. The point where this index reaches a plateau was selected, ensuring a good balance between precision and the number of simulations. To avoid overfitting, a minimum number of simulations was considered based on the number of parameters k, using the formula $1 + k + \frac{k*(k+1)}{2}$, yielding a minimum of 45 simulations for 8 parameters. **[6]**

Results

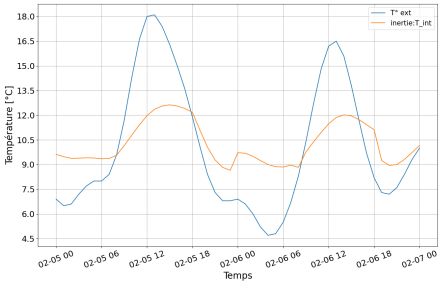
This section brings together the results of the simulations carried out with the Pléiades and Kozibu programs for both the particular configurations and the experimental plan.

Phase 1: Unoccupied Room

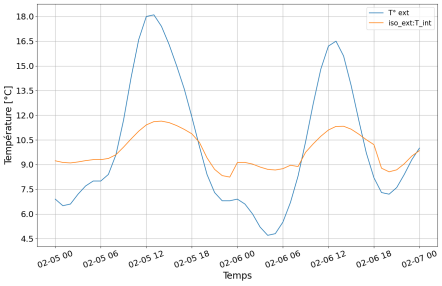
In this first phase, the studied volume is not equipped with heating or cooling devices and remains unoccupied. The quantities of interest—that is, the simulation output values—are the indoor temperature of the building, the temperature of its walls, and the PMV/PPD indices.

Simulations are performed for Ajaccio and Rennes, and two analysis points are identified:

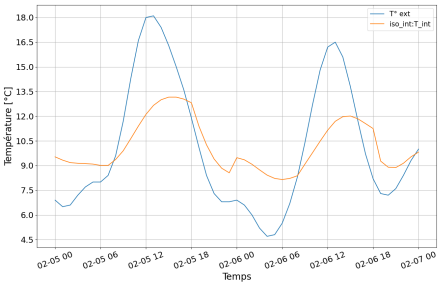
1. **Thermal phase shift and indoor temperature:** The evolution of the indoor and outdoor temperatures is plotted over 2 days in February in Ajaccio for the following configurations:



(a) Inertia (configuration 1)



(b) Exterior insulation (configuration 4)



(c) Interior insulation (configuration 3)

Figura 16: Comparison of the phase shift in February in Ajaccio

Own creation

In Figure 16, it is observed that the first configuration exhibits a temporal phase shift of 3 hours. This illustrates the inertia properties of raw earth materials such as rammed earth. The exterior insulation (conf. 4) nullifies the inertia properties of the massive material, whereas the interior insulation (conf. 3) preserves them; again, a 3-hour phase shift is observed.

In Pléiades, Table 7 shows the phase shift and temperature difference for Rennes.

Configuration (number)	**Phase shift (h)**	**Temperature difference (°C)**
Inertia (1)	2,69	−0,37
Insulation (2)	2,69	2,65
Interior insulation (3)	2,31	3,81
Exterior insulation (4)	2,39	−0,79
Exterior insulation, south wall not insulated (5)	2,38	−0,58
Interior insulation, south wall not insulated (6)	2,20	−0,97
Exterior corrector (7)	2,37	−1,67
Interior corrector (8)	2,31	−1,56

Tabla 7: Phase shift and temperature difference for each configuration (Rennes) with Pléiades

Own creation

The phase shift does not vary significantly between the different configurations.

Regarding the temperature difference (which corresponds to the annual average of $T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}$, i.e., the maximum daily temperatures inside and outside the building),

configurations with a positive average (those with interior or complete insulation) and those with a negative average are identified. The configurations with a negative difference are more suitable for warm climates, as they help maintain an indoor temperature lower than the outdoor one. Thus, the most effective configurations appear to be those equipped with a thermal corrector.

2. **Thermal Comfort**

Based on the statistical approach, the parameters that influence thermal comfort and those with marginal impact were identified. A total of 50 dynamic thermal simulations were carried out on the unoccupied volume, and the most important parameters were found to be:

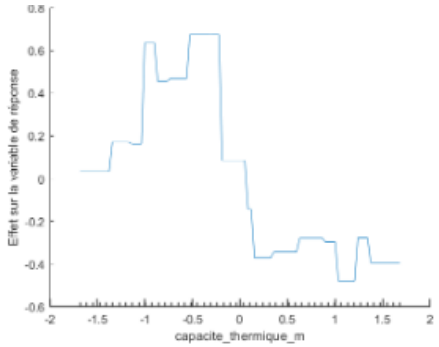
- the thickness of the construction material,
- the specific heat capacity of the material,
- the thickness of the insulation layer.

To achieve good thermal comfort, the following criteria must be met:

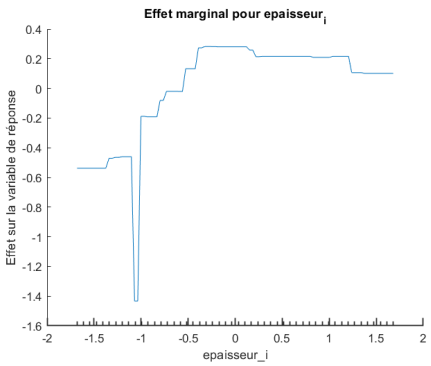
- Construction material thickness greater than 30 cm
- Specific heat capacity higher than 1350 J/kg·K
- Insulation thickness less than 15 cm

The study detected a negative effect of insulation: the thicker the layer, the lower the thermal comfort. The insulation acts as a barrier to rapid temperature changes, which in this case tends to prolong uncomfortable indoor thermal conditions. Therefore, it is recommended not to exceed 15 cm of insulation thickness, which is the lower limit evaluated in the study.

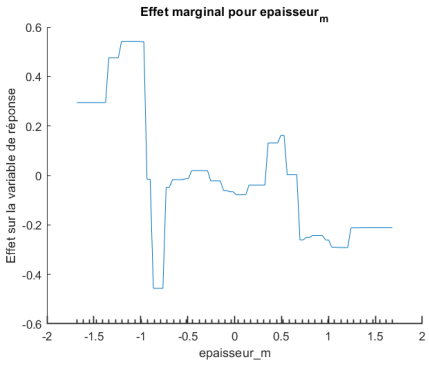
Nonetheless, some classic results are confirmed: increasing the construction material thickness increases the thermal phase shift, which allows temperature peaks to be shifted and thus improves comfort. Additionally, a high thermal capacity enables the wall to store more heat, which enhances the thermal lag effect.



(a) Specific heat capacity of the material



(b) Insulation thickness



(c) Material thickness

Figura 17: Evolution of discomfort degree-hours as a function of the significant parameters

Own creation

Figures 17 show the evolution of discomfort degree-hours as a function of these significant parameters. Since the results are normalized, they represent trends rather than absolute values: a high value indicates thermal discomfort, and a low value indicates comfort.

Phase 2: Occupied Room

In this phase, the same volume was simulated with heating and cooling systems and the presence of a family of four. Setpoint temperatures of 18°C in winter and 26°C in summer were defined. The analyzed variables were energy consumption and thermal comfort indicators.

In KoZiBu, a representative occupancy scenario for a family was implemented, modeling their daily presence: absent from Monday to Friday from 9 a.m., with the two children returning home at 4 p.m. and the two adults at 6 p.m.; on weekends, the family remains at home all day.

Energy consumption for a fixed power of 10 kW

The 8 specific configurations were simulated for Ajaccio and Rennes, and the results are shown in the following tables:

Configuration	Heating consumption [kWh]	Cooling consumption [kWh]	Total consumption [kWh]
Inertia (1)	13,357	39	13,396
Insulation (2)	9750	89	9839
Interior insulation (3)	9534	65	9599
Exterior insulation (4)	9197	16	9213
Exterior insulation + uninsulated south wall (5)	10,295	27	10,322
Interior insulation + uninsulated south wall (6)	10,231	27	10,258
Exterior corrector (7)	9599	14	9613

Tabla 8: Energy consumption of specific configurations — occupied cell in Ajaccio with KoZiBu

Own creation

Configuration	Heating consumption [kWh]	Cooling consumption [kWh]	Total consumption [kWh]
Inertia (1)	23,316	0	23,316
Insulation (2)	16,794	6	16,800
Interior insulation (3)	16,498	3	16,501
Exterior insulation (4)	16,121	0	16,121
Exterior insulation + uninsulated south wall (5)	17,834	0	17,834
Interior insulation + uninsulated south wall (6)	17,677	0	17,677
Lightweight earth (7)	16,934	0	16,934

Tabla 9: Energy consumption of specific configurations — occupied cell in Rennes with KoZiBu

Own creation

Energy consumption is generally higher in Rennes than in Ajaccio, which is explained by the milder climate in Ajaccio, requiring less heating.

Among the various configurations tested, configuration 1 (Inertia) turns out to be the least efficient.

Some configurations stand out due to their good results:

- Exterior and interior insulation offer the best performance.

- An alternative configuration, in which the south wall is not insulated but has a thermal corrector, also shows good results, with consumption only about 4 % higher than the most efficient configurations.

When analyzing heating and cooling consumption separately, it becomes evident that each climate requires different priorities in terms of energy efficiency strategies.

In Rennes, almost no cooling is needed; the main challenge is maintaining thermal comfort in winter (a heat-focused strategy).

In Ajaccio, although some cooling is required, it is still much less than heating use, so improving summer comfort (a cold-focused strategy) is also relevant.

Following the statistical method and analyzing the p-values, the significant variables are: the density of the material, the specific heat capacity of the material, the thermal conductivity of the material, the thickness of the material, the density of the insulation, the thermal conductivity of the insulation, and the thickness of the insulation.

The case of insulation thickness will be detailed below.

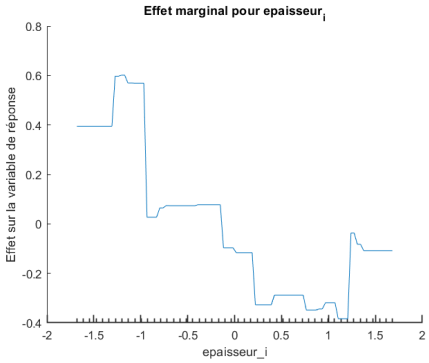


Figura 18: Influence of insulation thickness on energy consumption

Own creation

Figure 18 shows the evolution of energy consumption as a function of insulation thickness, chosen between 15 and 30 cm. It is observed that energy consumption decreases significantly as insulation thickness increases up to a limit of 18 cm, achieving a significant reduction. Increasing the thickness to 23 cm provides additional improvement, but beyond that point, the benefit in terms of consumption becomes marginal.

Thermal Comfort

Two metrics are defined: the absolute sum of the PMV and the number of hours in which the PPD exceeds 10 %. The results obtained are presented in Table 10.

Configuration	Ajaccio			Rennes		
	Absolute PMV sum	Number of hours PPD > 10 %	DH	Absolute PMV sum	Number of hours PPD > 10 %	DH
Inertia (1)	3660	8275	.	4999	8681	.
Insulation (2)	3395	8270	.	4307	8585	.
Interior insulation (3)	3353	8269	.	4384	8623	.
Exterior insulation (4)	3258	8162	.	4578	8733	.
Ext. insul. + uninsulated south wall (5)	3307	8240	.	4514	8687	.
Int. insul. + uninsulated south wall (6)	3317	8243	.	4580	8695	.
Exterior corrector (7)	3301	8166	.	4666	8733	.

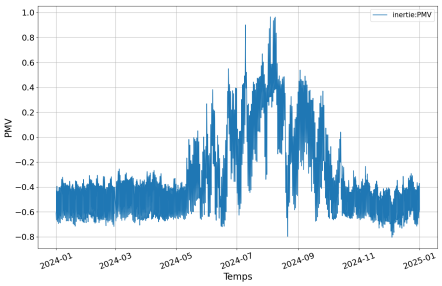
Tabla 10: Summary of thermal comfort indicators for Ajaccio and Rennes using KoZiBu

Own creation

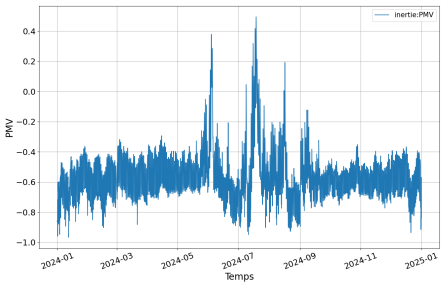
In both cities and for all configurations, the number of hours with a PPD above 10 % is very high, indicating persistent thermal discomfort. This is attributed to the low heating setpoint temperature (18°C).

In terms of PMV, both in Ajaccio and Rennes, the Inertia configuration proves to be the least favorable.

The evolution of the PPD and PMV indices in Ajaccio and Rennes is shown in Figures 19 and 20.



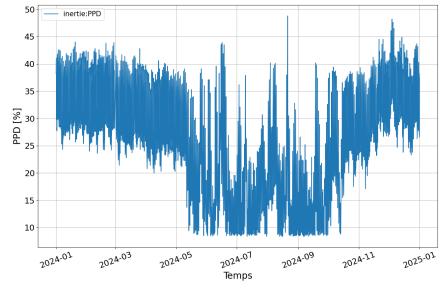
(a) PMV Inertia (configuration 1) Ajaccio



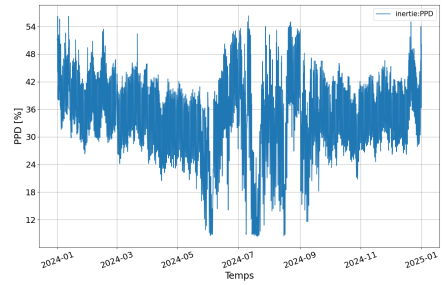
(b) PMV Inertia (configuration 1) Rennes

Figura 19: Comparison of PMV indices throughout the year

Own creation



(a) PPD Inertia (configuration 1) Ajaccio



(b) PPD Inertia (configuration 1) Rennes

Figura 20: Comparison of PPD indices throughout the year

Own creation

It is observed that for most of the year, the PMV is approximately -0.5 in both Ajaccio and Rennes, indicating a slight sensation of cold. During the summer, thermal sensation shifts to heat, more noticeably in Ajaccio, which is consistent. In the PPD graphs, it is evident that despite the presence of heating, due to its limited power, the building alone is not able to ensure satisfactory thermal comfort throughout the year.

The statistical analysis carried out using the design of experiments identified the parameters that significantly influence thermal comfort in this configuration. These parameters and their optimal values to maximize thermal comfort are:

- Construction material density above 1475 $\mathrm{kg\,m^{-3}}$,
- Specific heat capacity of the construction material above 1250 $\mathrm{J\,kg^{-1}\,K^{-1}}$,
- Thermal conductivity of the construction material above 0,28 $\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$,
- Construction material thickness above 35 cm — a performance plateau is observed beyond this value,
- Insulation thickness above 20 cm — a plateau is also observed beyond this value.

Conclusions

As part of this project, carried out in collaboration with amàco, the thermal potential of raw earth materials in construction was explored. This work is part of an ecological transition approach, reassessing the value of local, minimally processed, and sustainable materials.

Following an analysis of the thermal properties of different raw earths and the associated construction techniques, dynamic thermal simulation was conducted using the Kozibu and Pléiades software. Various wall configurations were tested, with data cross-referenced through a statistical design of experiments to measure their impact on indoor comfort and energy consumption.

The results show that thick walls made of materials with high bulk density and thermal capacity offer good comfort by regulating temperature fluctuations. High thermal conductivity also improves comfort but can increase energy demand. As for insulation, thickness is a key factor for comfort, while high density helps reduce consumption. However, none of the tested configurations meet the RE2020 requirements in the studied climates.

This project provided training in simulation and analysis tools, while also raising awareness of the importance of bio-based and sustainable materials in the context of sustainable construction.

Keywords: raw earth, dynamic thermal simulation, sustainable construction, thermal inertia, energy efficiency, thermal comfort.

References

[1] Amàco: *Ressources amaco*. Disponible à : `https://ressources.amaco.org/`. Consulté le 8 Octobre 2024.

[2] Anger Romain, Cloquet Basile, Couvreur Lucile, Doat Patrice, Fontaine Laetitia, Moevus-Dorvaux Mariette: *Béton d'Argile environnemental*. Brochure, 2010-2013. Consulté le 15 Octobre 2024.

[3] Auger Bertrand, Charry Sébastien, Daufouy Jérôme, Dolmaire Claire, Garnier Matthieu, Le Deuff Maxime, Mryankov Hristo, Prud'homme Sébastien, Tavares Vanden Berghe Brícia, Venzal Vincent, Wolny Philippe: *AIA LE PISÉ: Mieux concevoir & construire en terre crue*. Guide pédagogique, Janvier 2023. Consulté le 15 Octobre 2024.

[4] Bioul Sophie: *Principes techniques généraux de conception architecturale en terre crue en Île-de-France*. Mémoire, Novembre 2020. Consulté le 12 Novembre 2024.

[5] Champiré Florient, Fabbri Antonin, Heitz Philippe, Meunier Nicolas, Morel Jean-Claude, Soudani Lucile: *L'isolation du pisé: pertinence et principes*. Août 2015. Consulté le 12 Novembre 2024.

[6] Chassaing Jean-Paul, Chauveau Jean-Claude: *Introduction à la méthode de plans d'expériences par la méthode Taguchi*. Consulté le 3 Décembre 2024.

[7] Girerd Manon: *L'isolation thermique des murs en pisé par l'extérieur avec des matériaux bio et/ou géo sourcés: état des lieux de la pratique professionnelle actuelle et analyse des solutions techniques*. Thèse, Février 2024. Disponible à : `https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04472910`. Consulté le 15 Octobre 2024.

[8] Girerd Monon, Ple Olivier, Prime Noémie: *Analyse bibliographique préliminaire à l'étude du Comportement multifonctionnel de Parois Complexes géo et bio-Sourcées (ANR PACS+)*. Thèse, Juin 2024. Disponible à : `https://hal.science/hal-04593633`. Consulté le 15 Octobre 2024.

[9] Ministère de la transition écologique: *Guide RE2020*. Janvier 2024. Consulté le 10 Décembre 2024.

[10] Moya Jean-Pierre: *Un mur massif doit-il être isolé? Le fonctionnement de la façade sud*. Dossier, mars 2019. Consulté le 15 Octobre 2024.

[11] LGCB-ENTPE: *L'isolation du pisé: pertinence et principes*. Août 2015. Consulté le 1 Avril 2025.

[12] Quadco' engineering: *Définition PMV/PPD*. Consulté le 4 Avril 2025.

Agradecimientos

En primer lugar, se desea expresar el agradecimiento a Centrale Lyon, y en particular al Sr. David LENOIR, responsable de los proyectos de aplicación industrial dentro de la institución.

Asimismo, se agradece a la Sra. Anastasia TERRES, ordenante del proyecto en nombre de amàco, por la confianza depositada para la realización del proyecto y por el acompañamiento brindado a lo largo de toda la experiencia.

También se desea agradecer a la Sra. Céline HARTWEG-HELBERT, tutora del proyecto, cuya experiencia y visión externa resultaron de gran ayuda, especialmente en la toma de decisiones relacionadas con las simulaciones y la organización general.

No se puede dejar de mencionar al Sr. Jean NOËL, desarrollador del software de simulación térmica dinámica Kozibu, quien ofreció acompañamiento en el uso de dicha herramienta.

Igualmente, se agradece al Sr. Juan Noverto Moriñigo, coordinador del proyecto en España, por su acompañamiento constante en el desarrollo y la entrega del trabajo en el contexto local.

Este proyecto permitió aplicar los métodos de gestión de proyectos adquiridos durante la formación, desarrollar nuevas competencias en simulación térmica dinámica y descubrir la metodología de los planes de experiencia.

Índice general

Glosario xliii

1. Introducción y planteamiento del problema **1**
1.1. Marco del proyecto . . . 1
1.1.1. Contexto . . . 1
1.1.2. Problemática y objetivos . . . 2
1.1.3. Pliego de condiciones . . . 3
1.1.4. Organización . . . 4

2. Descripción de las tecnologías **5**
2.1. Transferencias térmicas . . . 5
2.1.1. La conducción . . . 6
2.1.2. La convección . . . 7
2.1.3. La radiación . . . 8
2.1.4. El balance energético de una superficie . . . 8
2.2. Inercia térmica . . . 9
2.2.1. El aislamiento térmico . . . 9
2.2.2. La capacidad calorífica específica . . . 9
2.2.3. La inercia . . . 10
2.3. Confort térmico . . . 12
2.3.1. Grado de horas de incomodidad (DH) . . . 12
2.3.2. PMV (Predicted Mean Vote) . . . 13
2.3.3. PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) . . . 13
2.4. Estrategias para el confort térmico . . . 14
2.4.1. Invierno: Estrategia para la gestión del calor . . . 14
2.4.2. Verano: Estrategia para el enfriamiento . . . 15
2.5. Características de la tierra cruda para la construcción . . . 16
2.5.1. Ventajas / Desventajas de la construcción con tierra cruda . . . 18
2.6. Software de simulación . . . 18
2.6.1. Pléiades: . . . 18
2.6.2. KoZiBu: . . . 19

3. Descripción del modelo desarrollado **20**
3.1. Configuraciones particulares estudiadas . . . 22
3.2. Elección de las simulaciones mediante el método de plan de experiencia . . . 24
3.2.1. ¿Qué es un plan de experiencia? . . . 25
3.2.2. ¿Qué resultados? . . . 25
3.2.3. Elección de los parámetros . . . 25
3.2.4. Elección del número de simulaciones . . . 26

4. Análisis de resultados **27**
4.1. Fase 1: Habitación vacía 27
4.1.1. Configuraciones particulares 27
4.1.2. Modelo estadístico 34
4.2. Fase 2: Habiación ocupada 36
4.2.1. Configuraciones particulares 36
4.2.2. Modelo estadístico 41
4.3. Sintesis de resultados 45

5. Conclusiones **46**
5.1. Perspectivas del proyecto 46

6. Bibliografia **48**

A. Organización temporal del proyecto: GANTT **50**

B. Propiedades térmicas y físicas de los materiales de tierra cruda **53**

C. Valores de los parámetros dados por el plan de experiencia para las simulaciones **54**

D. Código Python para trazar las curvas **56**
D.1. Código principal 56
D.2. Código para extraer los datos de Kozibu 56
D.3. Código para extraer los datos de Pléiades 58

E. Variación del índice PPD en función de los diferentes parámetros físicos **61**

F. Variación del consumo en función de los diferentes parámetros físicos **63**

G. Variación del índice PMV en función de los diferentes parámetros físicos **65**

H. Tabla resumen de las características de los materiales para las simulaciones **67**

I. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) **68**

Índice de figuras

1. Evolución de las temperaturas interior y exterior: ilustración del desfase y de la amortiguación debidos a la inercia térmica de un edificio III
2. Construcción del muro de pisé en el chai Château Cantenac Brown V
3. Modelo 3D del edificio en Pléiades VI
4. Mapa de Francia con sus diferentes climas VII
5. Esquema de las configuraciones particulares VIII
6. Comparación del desfase en el mes de febrero en Ajaccio X
7. Evolución del grado de incomodidad en función de los parámetros significativos XII
8. Influencia del espesor del aislante sobre el consumo XIV
9. Comparación de los índices PMV durante el año XV
10. Comparación de los índices PPD durante el año XV
11. Evolution of indoor and outdoor temperatures: illustration of the time lag and attenuation caused by a building's thermal inertia XIX
12. Construction of a rammed earth wall at Château Cantenac Brown wine cellar XXI
13. 3D model of the building in Pléiades XXII
14. Map of France with its different climate zones XXIII
15. Diagram of the particular configurations XXIV
16. Comparison of the phase shift in February in Ajaccio XXVI
17. Evolution of discomfort degree-hours as a function of the significant parameters XXVIII
18. Influence of insulation thickness on energy consumption XXX
19. Comparison of PMV indices throughout the year XXXI
20. Comparison of PPD indices throughout the year XXXI

2.1. Esquema de las treanferencias termicas en un volumen 6
2.2. Proceso de conducción en una barra 7
2.3. Los tres tipos de transferencia térmica 8
2.4. Balance térmico 9
2.5. Evolución de las temperaturas interior y exterior: ilustración del desfase y de la amortiguación debidos a la inercia térmica de un edificio 11
2.6. Variación del PPD según la temperatura y el tipo de actividad 14
2.7. Estrategias térmicas 16
2.8. Construcción del muro de pisé en el chai Château Cantenac Brown 17
2.9. El edificio más grande de Europa en pisé: La casa de las plantas de Ricola, de Herzog & De Meuron 17

3.1. Modelo 3D del edificio en Pléiades 20
3.2. Vista en corte de la composición del techo y el suelo de nuestro modelo . . 21

3.3. Esquema de las configuraciones particulares 22
3.4. Mapa de Francia con sus diferentes climas 24

4.1. Comparación del desfase en el mes de febrero en Ajaccio 28
4.2. Recordatorio de las configuraciones 28
4.3. Comparación del desfase en el mes de febrero en Rennes 29
4.4. Evolución del desfase a lo largo del año para 3 configuraciones diferentes . 30
4.5. Evolución de la diferencia de temperatura a lo largo del año para 3 configuraciones diferentes 31
4.6. Comparación de las temperaturas de los muros en el mes de julio en Ajaccio 33
4.7. Comparación de los índices PPD en Rennes y Ajaccio a lo largo del año . . 34
4.8. Comparación de los índices PMV en Rennes y Ajaccio a lo largo del año . 34
4.9. Variación del grado-hora de incomodidad en función de diferentes parámetros de entrada. 35
4.10. Comparación de los índices PMV durante el año 39
4.11. Comparación de los índices PPD durante el año 39
4.12. Comparación de los índices PMV durante el año 41
4.13. Comparación de los índices PPD durante el año 41
4.14. Influencia del espesor del aislante sobre el consumo 42
4.15. Comparación del modelo de consumo con respecto a los valores simulados . 43
4.16. Índice PMV en función de los parámetros de entrada significativos 44
4.17. Comparación de los modelos que tienen como salida los índices PMV y PPD con respecto a los valores simulados 45

A.1. GANTT 50

E.1. Índice PPD en función de los parámetros significativos 62

F.1. Consumo en función de los parámetros significativos 64

G.1. Índice PMV en función de los parámetros significativos 66

Índice de tablas

1. Correspondencia nombre/número de las configuraciones viii
2. Desfase y diferencia de temperatura para cada configuración (Rennes) con Pléiades x
3. Consumo de las configuraciones particulares — celda habitada en Ajaccio con KoZiBu xiii
4. Consumo de las configuraciones particulares — celda habitada en Rennes con KoZiBu xiii
5. Resumen de los indicadores de confort térmico para Ajaccio y Rennes en KoZiBu xiv
6. Correspondence between name and number of the configurations xxiv
7. Phase shift and temperature difference for each configuration (Rennes) with Pléiades xxvi
8. Energy consumption of specific configurations — occupied cell in Ajaccio with KoZiBu xxix
9. Energy consumption of specific configurations — occupied cell in Rennes with KoZiBu xxix
10. Summary of thermal comfort indicators for Ajaccio and Rennes using KoZiBu xxx

1.1. Objetivos del TFG 3
1.2. Pliego de condiciones del proyecto 3

2.1. Escala del PMV (Predicted Mean Vote) 13
2.2. Ventajas y desventajas de usar tierra cruda como material de construcción 18

3.1. Distribución de las ventanas 21
3.2. Escenario de ventilación 22
3.3. Correspondencia nombre/número de las configuraciones 23

4.1. Desfase y diferencia de temperatura para cada configuración (Ajaccio) con Pléiades 32
4.2. Desfase y diferencia de temperatura para cada configuración (Rennes) con Pléiades 32
4.3. Análisis de configuraciones particulares: habitación ocupada en Ajaccio con Pléiades 37
4.4. Análisis de configuraciones particulares: habitacion ocupada en Rennes con Pléiades 37
4.5. Consumo de las configuraciones particulares — celda habitada en Ajaccio con KoZiBu 37
4.6. Consumo de las configuraciones particulares — celda habitada en Rennes con KoZiBu 38

4.7. Resumen de los indicadores de confort térmico para Ajaccio y Rennes con una potencia infinita de calefacción y climatización 39
4.8. Resumen de los indicadores de confort térmico para Ajaccio y Rennes en KoZiBu 40

B.1. Propiedades térmicas y físicas de los materiales de tierra cruda (1/4) . . . 53
B.2. Propiedades térmicas y físicas de los materiales de tierra cruda (2/4) . . . 53
B.3. Propiedades térmicas y físicas de los materiales de tierra cruda (3/4) . . . 53
B.4. Propiedades térmicas y físicas de los materiales de tierra cruda (4/4) . . . 53

H.1. Propiedades térmicas de los materiales 67

Listado de códigos

D.1. Código para trazar los datos de Kozibu y Pléiades 56
D.2. Tratamiento de los datos de Kozibu y Pléiades 56
D.3. Tratamiento de los ficheros CSV para Pléiades 58

Glosario

Adobe: Ladrillos moldeados a mano y secados al sol.

Bauge: Tierra apisonada con fibras.

BTC: Bloque de Tierra Comprimida

DH: Degré d'heures d'inconfort →Grado de horas de incomodidad

Pisé: Tapia.

PMV: Predicted Mean Vote

PPD: Predicted Percentage of Dissatisfied

STD: Simulación térmica dinámica

Torchis: Mezcla tradicional de barro, fibras vegetales y agua utilizada para rellenar entramados de madera

Capítulo 1

Introducción y planteamiento del problema

En un contexto de transición energética y de lucha contra el cambio climático, el sector de la construcción desempeña un papel central en la reducción de la huella de carbono y la optimización de la eficiencia energética. Ante estos desafíos, los materiales biosostenibles y geosostenibles, como la tierra cruda, despiertan un interés creciente debido a sus propiedades térmicas y su bajo impacto ambiental.

La tierra cruda, utilizada desde hace milenios en la construcción, ofrece características únicas en términos de inercia térmica y regulación higrométrica. No obstante, su potencial aún está subexplotado, especialmente en lo que respecta a su integración en las estrategias térmicas modernas de los edificios. La optimización de su aplicación y la identificación de las mejores configuraciones para maximizar su eficiencia energética son cuestiones esenciales para fomentar su utilización a gran escala.

Este informe se enmarca en esta línea de trabajo, explorando las diferentes estrategias térmicas de implementación de materiales a base de tierra cruda en viviendas. A través de simulaciones térmicas dinámicas, se busca analizar el impacto de diversas configuraciones de muros sobre el confort térmico y el consumo energético de los edificios.

1.1. Marco del proyecto

1.1.1. Contexto

Desde hace un siglo, las necesidades en cuanto a confort térmico han evolucionado considerablemente. Hoy en día, buscamos mantener una temperatura agradable en el interior de nuestras viviendas, lo que ha provocado un uso creciente de la calefacción en invierno y del aire acondicionado en verano. Sin embargo, esta mayor exigencia de confort conlleva una problemática energética importante.

La crisis del petróleo de 1973 puso de manifiesto la dependencia energética de los edificios y condujo a la instauración de la primera normativa térmica en 1974, marcando así el inicio de una reflexión sobre el aislamiento térmico y la reducción del consumo energético. Desde entonces, las normativas han evolucionado progresivamente hasta llegar a la reciente RE2020, normativa francesa para la construcción de edificios, que ya no se limita únicamente a la eficiencia térmica, sino que también integra la dimensión ambiental, imponiendo una reducción del balance de carbono de los edificios y fomentando el uso de materiales de bajo impacto ambiental.

Por otra parte, el calentamiento global está intensificando la frecuencia y duración de las olas de calor. Ya no basta con aislar los edificios para conservar el calor en invierno: se vuelve igualmente crucial gestionar el sobrecalentamiento en verano, combinando aislamiento e inercia térmica para reducir la necesidad de aire acondicionado.

En este contexto, la tierra cruda se presenta como un material especialmente adecuado para los desafíos contemporáneos. Este material de bajo carbono ofrece numerosas ventajas:

- un impacto ambiental reducido, gracias a un proceso de fabricación que requiere poca energía y genera bajas emisiones de gases de efecto invernadero.
- propiedades térmicas interesantes: utilizada sola, la tierra cruda proporciona una alta inercia térmica; combinada con fibras, puede ofrecer también capacidades aislantes.
- un potencial para mejorar el confort térmico en todas las estaciones, contribuyendo a reducir las necesidades de calefacción en invierno y a limitar o incluso eliminar el uso de aire acondicionado en verano.

Inicialmente surgido del programa pedagógico Grains de Bâtisseurs, amàco es hoy un actor clave en la construcción de bajo carbono, contribuyendo a una transición ecológica del sector de la edificación.

Así, amàco (atelier matières à construire: taller de materiales de construcción), la entidad colaboradora, acompaña a profesionales y futuros profesionales de la construcción, la arquitectura y el diseño en el uso de materiales naturales locales como la tierra cruda y las fibras vegetales. Su objetivo es transformar estos recursos en soluciones constructivas sostenibles, al mismo tiempo que fomenta el desarrollo de cadenas de suministro locales.

La empresa combina ciencia, técnica, arte y arquitectura para revelar el potencial de materiales brutos como la arcilla, la arena o el bambú. Interviene a través de diversas actividades:

- Oficina de estudios en tierra cruda: asistencia, estudios y acompañamiento de proyectos.
- Diseño y Arquitectura: diseño y acondicionamiento de espacios.
- Formación: enseñanza y perfeccionamiento de profesionales.
- Talleres y exposiciones: sensibilización sobre los materiales naturales.
- Material pedagógico: desarrollo de recursos educativos.

1.1.2. Problemática y objetivos

Actualmente, no existe ni documentación ni estudios que hablen de las estrategias a adoptar en la utilización de materiales a base de tierra cruda.

Este proyecto tiene como objetivo explorar las propiedades de estos materiales mediante la realización de simulaciones térmicas dinámicas sobre un volumen simple representativo de un edificio. El objetivo es analizar el impacto de diferentes configuraciones de paredes sobre el consumo energético y el confort térmico.

Los resultados de las simulaciones permitirán aportar elementos de respuesta a los desafíos encontrados durante la rehabilitación o construcción de edificios en tierra cruda, identificando las mejores estrategias para lograr un rendimiento térmico óptimo y duradero.

De este modo, podemos definir los objetivos se van a abordar en este TFG (Trabajo de Fin de Grado). El conjunto de los objetivos se presenta en la Tabla 1.1 a continuación.

Objetivo	**Función**	**Medida**
Modelar dinámicamente la evolución de la temperatura en un volumen	Prever el comportamiento térmico en un edificio	Obtener curvas de temperatura y de energía
Analizar estrategias térmicas que integran materiales a base de tierra cruda	Caracterizar diferentes asociaciones para la construcción o rehabilitación de edificios	Informe de las diferentes estrategias estudiadas
Mejora continua del modelo dinámico	Diseñar diferentes fases del proyecto para aumentar la precisión y la complejidad de los modelos	Registros de las diferentes fases del proyecto y de los parámetros de simulación
Utilizar varios programas de simulación	Verificación de la coherencia de los resultados	Proporcionar una comparación de las simulaciones

Tabla 1.1: Objetivos del TFG

Elaboración propia

1.1.3. Pliego de condiciones

Además del objetivo presentado en la sección anterior, se puede definir el pliego de condiciones del proyecto. Este se muestra en la Tabla 1.2 a continuación.

Contexto y objetivos	- Optimizar el rendimiento térmico de los edificios en tierra cruda - Redactar un informe con el análisis de configuraciones para un edificio en tierra cruda
Alcance del proyecto	- La entrega final es un informe de análisis del estudio - No se realizarán ensayos experimentales
Público objetivo	- amàco y sus colaboradores
Restricciones técnicas	- Cumplir con las normas térmicas - Uso de software de simulación dinámica - Tratamiento de datos
Restricciones organizativas	- Entrega final prevista para abril de 2025
Criterios de rendimiento	- Entrega del informe - Trazas de simulaciones - Datos brutos
Modalidades de validación	- Validación del marco del proyecto por parte del cliente y el tutor

Tabla 1.2: Pliego de condiciones del proyecto

Elaboración propia

1.1.4. Organización

La organización temporal del proyecto se presenta mediante un diagrama de Gantt. El diagrama de Gantt está disponible en el Anexo A.

Por otro lado, el estudio se ha llevado a cabo a través de diferentes fases en las cuales se ha buscado evaluar el impacto de distintos parámetros:

- **Fase 1:** Estudio de una celda vacía no habitada, sin aporte de energía artificial como calefacción o aire acondicionado. En esta primera fase, se pretende identificar las estrategias de aislamiento e inercia más adecuadas, por lo que se analizará la evolución de la temperatura interior del edificio.
- **Fase 2:** Estudio de una celda habitada por una familia de 4 personas (2 adultos y 2 niños). Se busca evaluar las mejores estrategias en términos de confort térmico. Para ello, se utilizarán los índices PPD y PMV de confort térmico y el consumo energético del edificio.

Capítulo 2

Descripción de las tecnologías

La determinación de las estrategias térmicas óptimas requiere una comprensión profunda de los fenómenos de transferencia de calor, de la inercia térmica de los materiales y de su capacidad para regular la temperatura interior.

Los materiales a base de tierra cruda, debido a sus propiedades específicas, despiertan un interés creciente por su potencial en términos de inercia y regulación térmica. Su implementación, así como las diferentes técnicas de fabricación, influyen directamente en su comportamiento térmico y en su integración en la edificación.

Por último, la evaluación de estas prestaciones requiere herramientas adecuadas, de ahí la importancia de los programas de simulación térmica dinámica, que permiten analizar y optimizar las estrategias constructivas.

En esta sección exploraremos estos diferentes aspectos con el fin de comprender mejor los desafíos relacionados con el uso de la tierra cruda en la construcción y su impacto en el confort y el aislamiento térmico de los edificios.

2.1. Transferencias térmicas

Las transferencias térmicas juegan un papel fundamental en el rendimiento energético y el confort térmico dentro de un edificio. Se refieren a los mecanismos mediante los cuales el calor se intercambia entre medios con diferente temperatura, buscando siempre alcanzar un equilibrio térmico. Comprender estos mecanismos permite diseñar viviendas más eficientes, que cumplan con las normativas medioambientales y al mismo tiempo minimicen las pérdidas de energía.

En este contexto, los tres modos principales de transferencia térmica son:

- la conducción,
- la convección,
- la radiación.

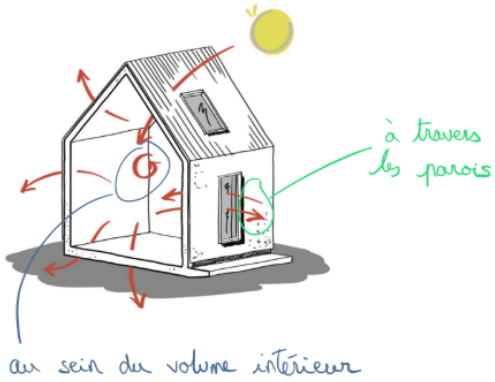


Figura 2.1: Esquema de las treanferencias termicas en un volumen

Elaboración propia

à travers des parois → a través de las paredes
au sein du volume intérieur → dentro del volumen interior

2.1.1. La conducción

La conducción es la transferencia de calor de un punto a otro, sin movimiento macroscópico de la materia. Este fenómeno ocurre principalmente en los sólidos, donde los átomos o moléculas vibran y transmiten su energía a sus vecinos. La ley fundamental que rige esta transferencia es la ley de Fourier:

$$\phi = -k \cdot \nabla T$$

donde:

- ϕ es el flujo térmico ($\mathrm{W\,m^{-2}}$),
- k es la conductividad térmica del material ($\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$),
- ∇T es el gradiente de temperatura ($\mathrm{K\,m^{-1}}$).

Cuanto menor sea la conductividad térmica k, más aislante será el material, lo que reduce las pérdidas de calor en invierno o las ganancias de calor en verano.

En una vivienda, la conducción ocurre principalmente a través de los muros, el techo, el suelo y las ventanas.
Así:

$$\phi = -k \cdot \frac{\Delta T}{e}$$

donde:

- e es el espesor de la pared (m).

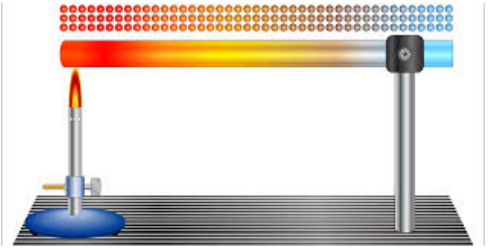


Figura 2.2: Proceso de conducción en una barra

Fuente: https://www.shutterstock.com/fr/image-vector/conduction-process-by-which-heat-transmitted-1047879727

2.1.2. La convección

La convección es el conjunto de movimientos internos que ocurren en un fluido y que implican el transporte de las propiedades de las partículas de ese fluido durante su desplazamiento. La convección puede ser:

- Natural: provocada por las diferencias de densidad debidas a las variaciones de temperatura.
- Forzada: inducida por un agente externo, como un ventilador o una bomba.

La ley de enfriamiento de Newton se utiliza para modelar esta transferencia:

$$\phi = h \cdot A \cdot (T_s - T_f)$$

donde:

- h es el coeficiente de transferencia térmica ($\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}$),
- A es la superficie de intercambio ($\mathrm{m^2}$),
- T_s y T_f son respectivamente las temperaturas de la superficie y del fluido (K).

En una vivienda se pueden distinguir dos tipos de convección:

- Convección interior: La convección ocurre cuando el aire en contacto con las superficies interiores transfiere calor a dichas superficies. Un sistema de calefacción (radiador o suelo radiante) crea movimientos de aire que distribuyen el calor por las estancias.
- Convección exterior: En el exterior, el viento acelera los intercambios térmicos entre la superficie de los muros y el aire ambiente. Una casa bien orientada y protegida por cortavientos naturales (árboles o setos) puede limitar estas pérdidas.

2.1.3. La radiación

Este modo de transferencia es específico porque no requiere un medio material. El calor se transfiere mediante ondas electromagnéticas, principalmente en el infrarrojo. Todos los cuerpos emiten una radiación térmica en función de su temperatura según la ley de Stefan-Boltzmann:

$$\phi = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

donde:

- ϵ es la emisividad del material (valor sin unidad, comprendido entre 0 y 1),
- σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5{,}67 \times 10^{-8}\,\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-4}}$),
- A es la superficie del cuerpo (m^2),
- T es la temperatura absoluta (K).

Por ejemplo, la radiación solar que entra por las ventanas. Una gran parte de la energía solar es absorbida por los cristales y calienta el interior.

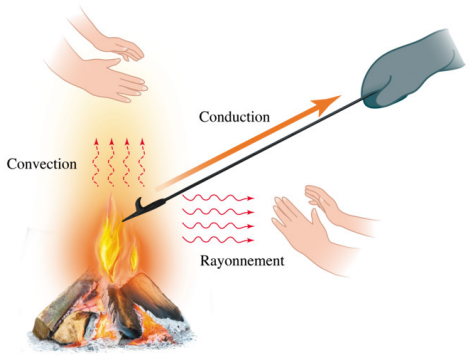


Figura 2.3: Los tres tipos de transferencia térmica

Fuente: https://monde.ccdmd.qc.ca/ressource/?id=127178&demande=desc

convection → convección, conduction → conducción, rayonnement → radiación

2.1.4. El balance energético de una superficie

Cuando una superficie está sometida a una transferencia térmica, pueden ocurrir varios fenómenos simultáneamente:

- Absorción (α) : una parte de la energía incidente es absorbida por el material.
- Reflexión (ρ) : una parte es reflejada.
- Transmisión (τ) : una parte atraviesa la superficie.

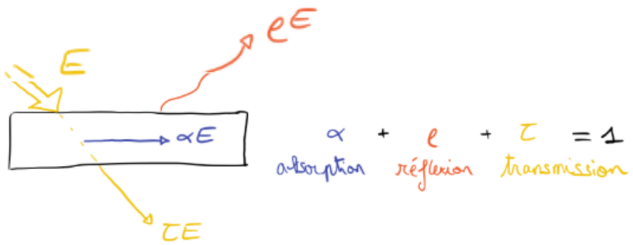


Figura 2.4: Balance térmico

Elaboración propia

Estas fracciones cumplen con la siguiente relación:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

2.2. Inercia térmica

Antes de abordar el concepto de inercia térmica, es esencial comprender algunos conceptos básicos relacionados con el comportamiento térmico de los materiales: el aislamiento térmico y la capacidad calorífica específica.

2.2.1. El aislamiento térmico

El aislamiento térmico se refiere a la capacidad de un material para limitar los intercambios de calor entre dos medios (por ejemplo, entre el interior y el exterior de un edificio). Depende de dos magnitudes físicas principales:

- **La conductividad térmica** (λ): expresada en W/m·K, indica la facilidad con la que un material deja pasar el calor. Cuanto más baja es la conductividad, mejor es el poder aislante del material.
- **La resistencia térmica** (R): expresada en $\mathbf{m^2}$·K/W, se calcula dividiendo el espesor del material por su conductividad térmica:

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

  Cuanto mayor sea esta resistencia, más limita el material el paso del calor.

Los materiales aislantes como la lana de vidrio, el poliestireno o la celulosa tienen una baja conductividad térmica, lo que les permite reducir las pérdidas de calor a través de las paredes.

2.2.2. La capacidad calorífica específica

Otro aspecto fundamental es la capacidad de un material para almacenar calor. Esto depende de:

- La **capacidad calorífica específica** (c) expresada en J/kg·K: mide la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un kilogramo de material un grado Celsius.

- Combinada con la **densidad** (ρ), se obtiene la **capacidad calorífica volumétrica**:

$$\rho \times c$$

  Esta magnitud expresa la capacidad de un material para almacenar calor por unidad de volumen.

Un material pesado, con una alta capacidad calorífica específica, podrá absorber mucho calor sin calentarse rápidamente.

2.2.3. La inercia

La inercia térmica es la capacidad de un material o de un edificio para almacenar y devolver el calor con cierto retraso en el tiempo. Juega un papel fundamental en la regulación de la temperatura interior, ya que limita las variaciones térmicas entre el día y la noche. Cuanto mayor es la inercia térmica de un material, más tiempo tarda en calentarse y enfriarse, lo que contribuye a un mejor confort térmico dentro de los edificios.

La inercia térmica de un material depende directamente de su **densidad** (ρ) y de su **capacidad calorífica específica** (C_p). De hecho, la cantidad de calor que un material puede almacenar se expresa mediante el producto $Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$, donde m es la masa del material. Así, cuanto más pesado es un material (mayor masa) y mayor es su capacidad calorífica, más cantidad de calor podrá absorber o devolver sin provocar variaciones rápidas de temperatura.

En la construcción, la inercia térmica es esencial para mejorar la eficiencia energética de un edificio. Una buena inercia permite reducir el consumo energético, especialmente al limitar el uso de calefacción en invierno y de aire acondicionado en verano. Por ejemplo, materiales como el hormigón, la piedra o el ladrillo tienen una alta inercia térmica, lo que les permite acumular calor durante el día y devolverlo lentamente por la noche.

La tierra cruda posee una elevada inercia térmica, lo que significa que absorbe, almacena y devuelve lentamente el calor. Esta propiedad permite regular naturalmente la temperatura interior de un edificio, reduciendo las diferencias térmicas entre el día y la noche.

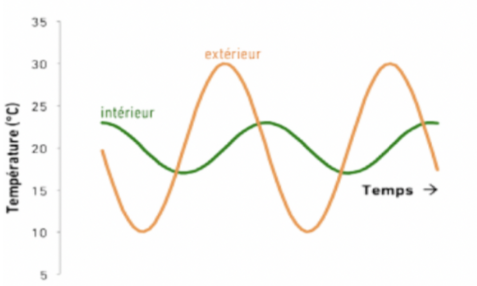


Figura 2.5: Evolución de las temperaturas interior y exterior: ilustración del desfase y de la amortiguación debidos a la inercia térmica de un edificio

Fuente: https://miao.ensad.fr/2018/08/21/les-proprietes-thermiques-2/

En esta figura, se puede observar un desfase de varias horas entre las curvas de temperatura interior y exterior. Este desfase se debe a la inercia térmica del edificio, que retrasa la respuesta de la temperatura interior respecto a las variaciones exteriores. Además, la amplitud de las variaciones de temperatura interior está atenuada debido al efecto aislante de los materiales de construcción, que limitan los intercambios térmicos con el exterior.

También se consideran dos propiedades fundamentales: la difusividad térmica y la efusividad térmica. Estos parámetros influyen directamente en la forma en que un material reacciona a las variaciones de temperatura y cómo interactúa con su entorno.

La **difusividad térmica** α caracteriza la velocidad a la que el calor se propaga a través de un material cuando está sometido a una variación de temperatura. Se define por la relación:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \tag{2.1}$$

donde λ es la conductividad térmica, ρ la densidad y c la capacidad calorífica específica del material. Un material con baja difusividad térmica tarda más en transmitir el calor, lo que permite atenuar las fluctuaciones térmicas dentro de un edificio y mejorar el confort de los ocupantes.

La **efusividad térmica** e, por su parte, expresa la capacidad de un material para intercambiar calor con su entorno. Se da mediante la fórmula:

$$e = \sqrt{\lambda \rho c} \tag{2.2}$$

Un material con baja efusividad térmica no transmite rápidamente el calor en su superficie, lo que permite reducir la sensación de paredes frías en invierno y paredes calientes en verano.

Así, al elegir los materiales para la construcción, es esencial buscar un equilibrio entre estas propiedades para garantizar un rendimiento térmico óptimo. Un material ideal para un edificio con alta inercia térmica debe tener una baja difusividad térmica, para ralentizar las transferencias de calor, y una baja efusividad térmica, para limitar los intercambios térmicos rápidos con el aire interior, contribuyendo así a un confort térmico duradero para los habitantes [**2**].

2.3. Confort térmico

El confort térmico es una noción subjetiva que refleja la satisfacción de un individuo con respecto al entorno térmico en el que se encuentra. Depende de varios parámetros, que pueden agruparse en dos categorías principales:

Parámetros ambientales:

- La temperatura del aire ambiente
- La temperatura de las superficies (temperatura radiante)
- La humedad relativa
- La velocidad del aire
- Las contribuciones solares e internas (ocupantes, equipos, iluminación)
- Temperatura percibida o temperatura operativa
  - Esta temperatura representa una aproximación de la sensación térmica real percibida por una persona en un espacio determinado.
  - Se define como el promedio ponderado entre la temperatura del aire ambiente y la temperatura media de las superficies circundantes, según la siguiente fórmula:

$$T_{\text{operativa}} = \frac{1}{2}\left(T_{\text{aire}} + T_{\text{superficies}}\right)$$

  - Esta aproximación es válida en condiciones estándar: una humedad relativa moderada, generalmente entre el 30 % y el 60 %, una velocidad del aire despreciable (ausencia de corrientes de aire o infiltraciones importantes), y una renovación de aire interior suficiente pero no perturbadora.

Parámetros relacionados con los ocupantes

- La actividad física, que genera una producción de calor más o menos importante
- La vestimenta, que influye en el aislamiento térmico del cuerpo

Para cuantificar el confort térmico en un edificio, se utilizan varios indicadores, entre ellos el PMV, el PPD y el grado de horas de incomodidad.

2.3.1. Grado de horas de incomodidad (DH)

El grado de horas de incomodidad es un indicador que cuantifica la incomodidad térmica durante un periodo determinado. Se calcula integrando, hora por hora, la diferencia entre la temperatura interior del edificio y un rango de confort predefinido.

Por ejemplo, si la temperatura de confort se fija en 26C y la temperatura interior alcanza los 30 °C durante 3 horas, el DH será: $(30 - 26) \times 3 = 12$ °C.h.

Este indicador solo es pertinente en el caso de edificios sin calefacción ni climatización, ya que estos sistemas modifican artificialmente la temperatura interior, haciendo que el cálculo del DH sea menos representativo del confort real.

Cuanto mayor sea el DH, mayor será el riesgo de incomodidad térmica en el edificio. Este indicador es especialmente útil para evaluar el riesgo de sobrecalentamiento en verano y comparar diferentes estrategias de mejora del confort (aislamiento, inercia, ventilación, protecciones solares, etc.).

El DH es rápido de calcular y requiere muy pocos recursos (solo la temperatura interior hora a hora). Por lo tanto, es útil para estimar rápidamente si un edificio es energéticamente eficiente. Sin embargo, carece de precisión para una evaluación detallada del confort térmico. Por ello, se suelen preferir otros indicadores más elaborados, como el PPD y el PMV, para un análisis más profundo.

2.3.2. PMV (Predicted Mean Vote)

El PMV es un índice que evalúa la sensación térmica media de un grupo de individuos en un entorno determinado. Se define en una escala que va de -3 (frío) a +3 (calor), donde 0 representa una sensación térmica neutra. Se calcula en función de los parámetros ambientales y de las características de los ocupantes (por ejemplo, la ropa que llevan puesta) [**12**].

Valor PMV	**Sensación térmica**
-3	Frío intenso
-2	Frío
-1	Ligeramente frío
0	Neutro
+1	Ligeramente cálido
+2	Cálido
+3	Calor intenso

Tabla 2.1: Escala del PMV (Predicted Mean Vote)

Elaboración propia

2.3.3. PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)

El PPD es un índice derivado del PMV que representa el porcentaje de personas insatisfechas con las condiciones térmicas. Generalmente se utiliza como complemento del PMV para cuantificar el nivel de incomodidad en un espacio determinado. Un PPD del 10 % significa que el 10 % de los ocupantes experimentan molestias térmicas, ya sea por exceso de frío o de calor [**12**].

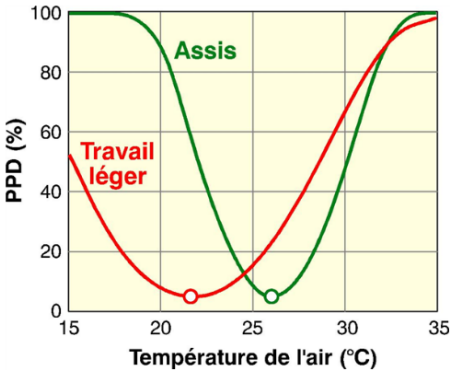


Figura 2.6: Variación del PPD según la temperatura y el tipo de actividad

Fuente: https://www.batitherm.ch/confort-thermique.html

Travail léger → Trabajo ligero, Assis → Sentado
Témperature de l'air → Temperatura del aire.

La figura muestra el porcentajes de personas insatisfechas (PPD), representado en el eje vertical, para personas en reposo (sentadas) o realizando un trabajo ligero. Es imposible definir una temperatura que sea adecuada para todos: en el mejor de los casos, siempre habrá al menos un 4 % de personas insatisfechas, representado por el punto en la parte más baja de la curva. La curva que representa el trabajo ligero se desplaza hacia temperaturas más bajas: las personas que generan más calor corporal prefieren temperaturas más frescas. En cambio, la curva de los sujetos en reposo es más estrecha: estas personas son más sensibles a pequeñas variaciones de temperatura.

2.4. Estrategias para el confort térmico

2.4.1. Invierno: Estrategia para la gestión del calor

En el contexto invernal, el objetivo principal es maximizar la captación de la energía solar disponible y minimizar las pérdidas térmicas con el fin de mantener un entorno interior confortable sin recurrir en exceso a sistemas de calefacción con alto consumo energético [**3**].

1. **Captar la mayor cantidad posible de energía solar**:

   El primer paso en la gestión térmica durante el invierno consiste en optimizar la absorción de energía solar. Para ello, se puede elegir una orientación adecuada de las superficies acristaladas, idealmente hacia el sur en el hemisferio norte, para captar la máxima radiación solar durante los días de invierno. El uso de materiales con alta capacidad térmica para las superficies vidriadas, como el vidrio de baja emisividad (Low-E), contribuye a gestionar mejor la cantidad de calor transmitido al interior.

2. **Almacenar la energía en las paredes internas**:

   Para aprovechar la energía solar captada durante el día, es importante utilizar materiales con alta inercia térmica en las paredes internas del edificio. Estos materiales almacenan el calor acumulado durante el día y lo liberan lentamente durante la noche, cuando las temperaturas exteriores bajan. Este fenómeno es particularmente

beneficioso durante periodos de frío intenso ya que permite mantener una temperatura interior constante sin recurrir a sistemas de calefacción.

3. **Conservar el calor en el interior**:

   Una vez que se ha captado y almacenado la energía, es fundamental limitar las pérdidas térmicas. La implementación de un aislamiento eficiente en muros, techos y ventanas permite mantener el calor dentro del edificio. Se pueden utilizar sistemas de ventilación mecánica para optimizar la circulación del aire preservando el calor.

2.4.2. Verano: Estrategia para el enfriamiento

En el marco del diseño y optimización del confort térmico de un edificio en verano, el objetivo principal es limitar la acumulación de calor en el interior de los edificios para garantizar un entorno agradable y reducir el consumo energético asociado a la refrigeración artificial [**3**].

1. **Limitación de las ganancias solares:**

   Con el fin de reducir la acumulación de calor en el interior de un edificio, es esencial minimizar la exposición directa al sol sobre las superficies. Para ello, se pueden aplicar varias estrategias, entre ellas:

   - Optimizar la orientación de las superficies vidriadas, limitando su exposición directa al sol, especialmente las orientadas al oeste y al sur durante el periodo estival.

   - Utilizar protecciones solares eficaces, como celosías, persianas o contraventanas, que limiten la radiación solar entrante, así como protecciones solares naturales.

2. **Desfase de la ganancia de calor transmitida por las paredes:**

   El desfase térmico busca ralentizar la transmisión del calor exterior hacia el interior del edificio, permitiendo así diferir su entrada y atenuar las variaciones de temperatura. Esta estrategia se basa en:

   - El uso de materiales con alta inercia térmica (hormigón, piedra, tierra cruda), que absorben y liberan lentamente el calor, evitando así un aumento rápido de la temperatura interior.

   - La optimización del aislamiento de las paredes exteriores, con el fin de limitar los intercambios térmicos y mantener una temperatura interior estable.

3. **Disipación del calor acumulado:**

   Una vez que el calor está presente en el interior del edificio, es esencial evacuarlo eficazmente para evitar el sobrecalentamiento. Para ello, se pueden aplicar varias soluciones:

   - Integración de sistemas de ventilación natural nocturna, que permiten refrescar los espacios interiores creando una corriente de aire entre las aberturas.

   - Uso de sistemas de ventilación mecánica, como la ventilación de doble flujo con bypass estival, que favorece la evacuación del aire caliente optimizando al mismo tiempo la renovación del aire.

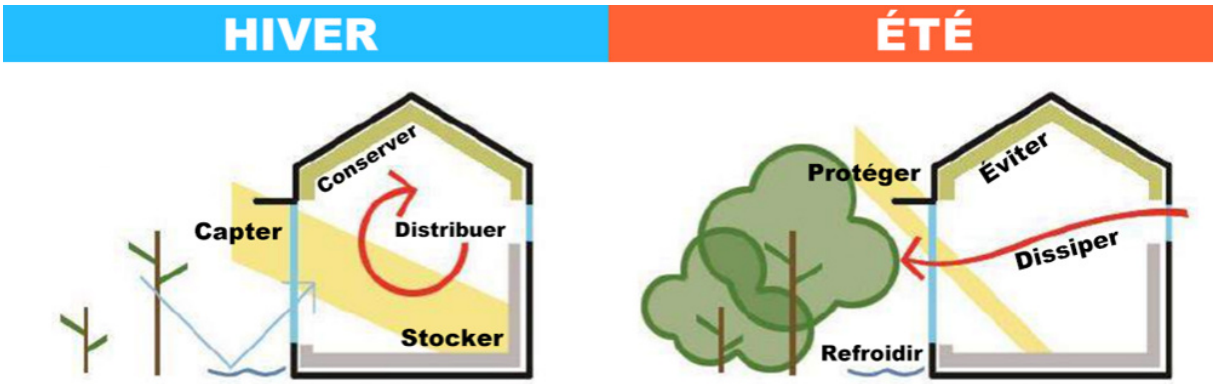


Figura 2.7: Estrategias térmicas

Fuente: https://www.materiaux-naturels.fr/blog/87-confort-thermique

- Capter → Captar
- Conserver → Conservar
- Distribuer → Distribuir
- Stocker → Almacenar
- Protéger → Proteger
- Éviter → Evitar
- Dissiper → Disipar
- Refroidir → Refrescar

2.5. Características de la tierra cruda para la construcción

En la construcción con tierra cruda se distinguen dos grandes categorías de materiales según su función y su capacidad para estructurar el edificio [**1**]:

1. **Materiales masivos (soportantes):** capaces de crear muros y soportar cargas. Estos materiales tienen una alta inercia térmica y se utilizan para erigir los muros soportantes de un edificio, ya sea en envolvente (muros exteriores) o en refuerzo (muros interiores soportantes).
   - Bauge (barro): Mezcla de tierra, agua y fibras vegetales (como la paja). Aplicado en capas gruesas, se seca al aire libre para formar paredes sólidas.
   - Tapia: Tierra cruda compactada en un encofrado, lo que da muros densos y resistentes con una excelente inercia térmica.
   - Adobe: Ladrillos moldeados a mano y secados al sol, a menudo utilizados con mortero de tierra.
   - Bloque de Tierra Comprimida (BTC): Ladrillos de tierra moldeados bajo presión, lo que permite una construcción modular con buena solidez.
2. **Materiales de acabado** – que sirven principalmente de protección, regulación higrométrica y mejora estética. Sirven como revestimiento, protegiendo los muros masivos y regulando la humedad, jugando un papel esencial en la durabilidad y el confort del edificio.

- Revestimiento de tierra cruda: Aplicado en capas finas sobre los muros de pisé, BTC, bauge, adobes, torchis o tierra aligerada. Protege la superficie manteniendo la transpirabilidad del material.
- Torchis (Tapia de barro): Mezcla de tierra, fibras vegetales y agua, a menudo utilizado para rellenar estructuras de madera.

3. **Tierra aligerada:** Mezcla de tierra y materiales ligeros (paja, cáñamo, serrín, etc.), utilizada para rellenar estructuras de madera o en complemento de muros soportantes de tapia, BTC o adobe. Mejora el aislamiento térmico y reduce el peso de las paredes mientras mantiene la transpirabilidad.

Algunos ejemplos de uso de la tierra cruda:



Figura 2.8: Construcción del muro de pisé en el chai Château Cantenac Brown

Fuente: https://amaco.org/un-nouveau-chai-en-terre-crue-zero-ciment-du-chateau-cantenac-brown/



Figura 2.9: El edificio más grande de Europa en pisé: La casa de las plantas de Ricola, de Herzog & De Meuron

Fuente: https://amaco.org/le-plus-grand-batiment-deurope-en-pise-la-maison-des-plantes-de-ricola-dherzog-de-meuron/

2.5.1. Ventajas / Desventajas de la construcción con tierra cruda

Al evaluar los materiales de construcción, es esencial considerar tanto sus ventajas como sus desventajas para garantizar su adecuación a los requisitos técnicos y medioambientales de un proyecto [**2**]. La tabla siguiente resume estos aspectos para la construcción con tierra cruda:

Ventajas	**Desventajas**
Ecológico y duradero, con bajo impacto medioambiental.	**Aislamiento** térmico moderado, que puede optimizarse con la adición de fibras.
Capacidad de carga adecuada para la mayoría de aplicaciones (resistencia a la compresión de 1 a 2 MPa).	Vulnerable a la humedad y a las infiltraciones, necesitando protección eficaz contra el agua.
Excelente **inercia térmica**: almacena calor y lo devuelve lentamente, mejorando **la eficiencia energética**.	Requiere un mantenimiento periódico para asegurar su longevidad y evitar reparaciones.
Regula naturalmente la temperatura interior, reduciendo las variaciones de calor y aumentando la sensación de **confort**.	

Tabla 2.2: Ventajas y desventajas de usar tierra cruda como material de construcción

Elaboración propia

2.6. Software de simulación

Se han utilizado dos programas para realizar la Simulación Térmica Dinámica. La simulación térmica dinámica es un método de modelado numérico de un edificio que permite analizar y prever su comportamiento térmico, teniendo en cuenta diversos parámetros, como los materiales utilizados, la disposición de los espacios, los sistemas de ventilación, calefacción y aire acondicionado, así como las condiciones climáticas exteriores.

2.6.1. Pléiades:

La parte de STD (Simulación Térmica Dinámica) de Pléiades permite analizar en detalle el comportamiento térmico de los edificios teniendo en cuenta la evolución de las condiciones exteriores (meteorología) y los usos internos hora a hora. El modelador de Pléiades (subprograma para la parte de STD) integra escenarios de ocupación, sistemas de calefacción y refrigeración variados, así como estrategias de gestión de aberturas y protecciones solares. Este modelado permite estimar el consumo energético de un edificio durante un período determinado.

Más allá de esta estimación energética, el software también evalúa el confort térmico de los ocupantes hora a hora mediante los indicadores PMV (Predicted Mean Vote) y PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied).

Finalmente, Pléiades permite estimar el nivel de humedad dentro del edificio. Sin embargo, numerosos estudios indican que esta estimación se vuelve imprecisa cuando los muros son transpirables (que permiten el paso de vapor de agua). En particular, para los edificios de tierra cruda, algunos artículos científicos [**11**] señalan que los resultados de la STD no coinciden con las observaciones experimentales.

2.6.2. KoZiBu:

KoZiBu es un software de STD independiente desarrollado por M. Jean NOËL. Este software es similar a Pléiades y permite diseñar espacios, aplicar condiciones particulares (en términos de ventilación, calefacción, aire acondicionado, presencia de habitantes o no, así como gestionar los momentos de funcionamiento/presencia de estos diferentes elementos). La principal ventaja de este software es que es completamente gratuito y muy completo. Para algunos aspectos, actúa como un complemento de Pléiades y nos permite verificar la pertinencia o incertidumbre sobre los resultados, realizando dos simulaciones perfectamente similares en dos programas diferentes. Para otros resultados, KoZiBu permite profundizar más: permite, por ejemplo, obtener la temperatura de la superficie de cada uno de los muros, lo cual no es posible en Pléiades.

Existe una versión Beta no disponible para el público general que ofrece un análisis del confort térmico a la que tuve acceso. Esta utiliza los mismos indicadores que Pléiades, el PPD y el PMV, lo que nos permite comparar los resultados proporcionados por ambos programas y así tener un mayor fiabilidad sobre los resultados obtenidos.

El principal interés de KoZiBu es que posee un sistema de scripts que permite definir completamente un estudio mediante 11 archivos de texto (extensión .txt), 10 de los cuales definen todos los parámetros y un último que llama a todos los demás. Esto permite sistematizar la escritura de estudios y variarlos fácilmente modificando uno o varios parámetros. Esto constituye una gran ventaja en la realización de las simulaciones del plan de experiencia. Además, KoZiBu es ligero y no requiere instalación como un software, lo que permite su uso en todo tipo de máquinas.

Los principales puntos negativos de KoZiBu son:

- su mala ergonomía, que requiere un tiempo considerable de manipulación del software antes de dominarlo;
- Algunos errores en el software que toman tiempo para ser sorteados: por ejemplo, al definir materiales propios, uno de ellos se llama 'i9', y este nunca pudo ser leído por el software (aunque todos los demás i_k funcionaron sin problema).
- la imposibilidad de automatizar el lanzamiento de simulaciones y la escritura de resultados en un archivo, lo que hace que el lanzamiento de un conjunto de simulaciones sea largo y tedioso.

Capítulo 3

Descripción del modelo desarrollado

Para realizar este proyecto, se llevaron a cabo simulaciones térmicas dinámicas con el fin de analizar el impacto de diferentes parámetros sobre el confort térmico, la evolución de la temperatura interior y el consumo energético. Estas simulaciones se realizaron siguiendo dos enfoques complementarios: por una parte, el estudio de configuraciones particulares que permite examinar casos específicos, y por otra, el uso de un plan de experiencia orientado a identificar de forma sistemática los factores más influyentes.

El volumen estudiado corresponde a una única habitación de 100 m^2 y 2.5 m de altura con techo.

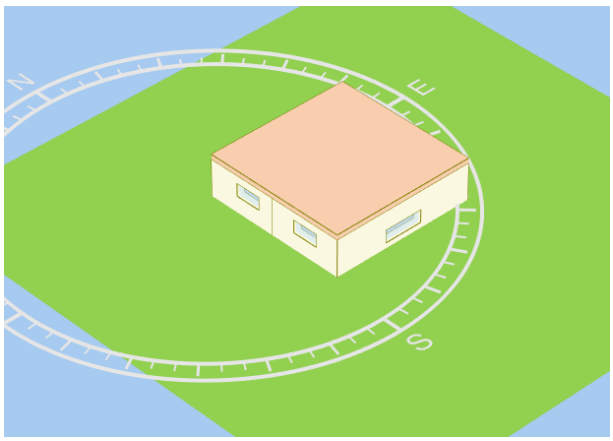


Figura 3.1: Modelo 3D del edificio en Pléiades

Elaboración propia

Las composiciones del suelo y del techo se mantuvieron constantes a lo largo de todas las simulaciones y se presentan en la figura 3.2 a continuación.

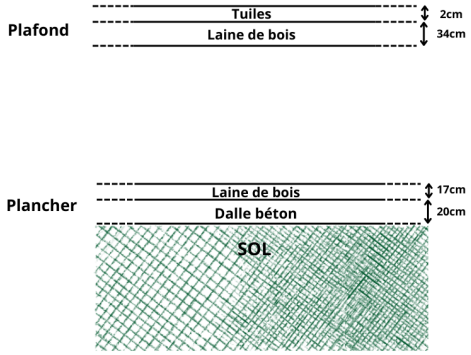


Figura 3.2: Vista en corte de la composición del techo y el suelo de nuestro modelo

Elaboración propia

Plafond: Techo

- Tuiles: Tejas (2 cm)
- Laine de bois: Lana de madera (34 cm)

Plancher: Suelo

- Laine de bois: Lana de madera (17 cm)
- Dalle de béton: Losa de hormigón (20 cm)
- Sol: Terreno natural (Suelo)

Aberturas

En cuanto a las aberturas, se colocaron ventanas en las cuatro paredes (Norte, Sur, Este y Oeste). A continuación se presentan las proporciones superficiales de ventanas en cada fachada.

Orientación del muro	Superficie ocupada por ventanas
Norte	8 %
Sur	12 %
Este	12 %
Oeste	16 %

Tabla 3.1: Distribución de las ventanas

Elaboración propia

Ventilación

También se implementó un escenario de ventilación para simular la aireación del hogar,

la ventilación mecánica controlada (VMC) y las infiltraciones de aire. A continuación, se muestra una tabla resumen con la evolución de la ventilación a lo largo del día.

Franja horaria	Tasa de renovación de aire (vol/h)
0-7h	1
7-8h	5.5
8-17h	0.55
17-23h	5.5
23-0h	1

Tabla 3.2: Escenario de ventilación

Elaboración propia

Este escenario se basa en casos reales de ventilación en edificios habitados.

3.1. Configuraciones particulares estudiadas

En esta sección exploramos configuraciones particulares que representan casos específicos y a veces extremos. El análisis de estas situaciones permite poner en evidencia tendencias y obtener las primeras conclusiones sobre el comportamiento térmico de los materiales. Estas configuraciones fueron elegidas con el fin de ilustrar los límites y las variaciones posibles en función de las condiciones impuestas. La figura 3.3 a continuación resume estos diferentes casos.

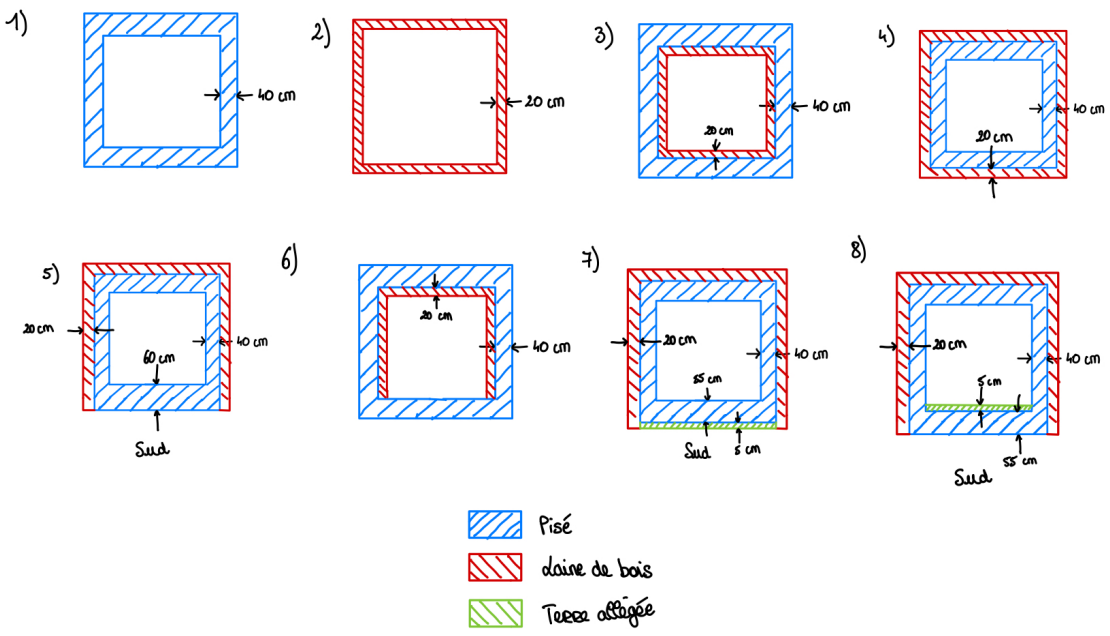


Figura 3.3: Esquema de las configuraciones particulares

Elaboración propia

Pisé → Tapia ("Tierra apisonada"), Laine en bois → Lana de madera, Terre allégée → Tierra aligerada (mezcla de tierra con materiales ligeros como fibras vegetales)

La correspondencia entre las configuraciones y su nombre se da en la tabla 3.3 a continuación.

Número	Nombre
1	Inercia
2	Aislante
3	Aislamiento interior
4	Aislamiento exterior
5	Aislamiento exterior y muro sur sin aislar
6	Aislamiento interior y muro sur sin aislar
7	Corrector exterior
8	Corrector interior

Tabla 3.3: Correspondencia nombre/número de las configuraciones

Elaboración propia

El material masivo utilizado es la tapia y el aislante seleccionado es la lana de madera. Las características térmicas de estos materiales se recopilan en el Anexo H.

Francia cuenta con 4 climas diferentes según sus regiones:

- **Clima mediterráneo:**
  - Veranos calurosos y secos, muy soleados.
  - Inviernos suaves y húmedos.
  - Precipitaciones concentradas en otoño e invierno.
  - Baja amplitud térmica anual.
- **Clima oceánico:**
  - Temperaturas suaves todo el año.
  - Inviernos frescos, veranos templados.
  - Precipitaciones regulares durante todo el año.
  - Alta humedad, cielo frecuentemente nublado.
- **Clima continental:**
  - Inviernos fríos y rigurosos.
  - Veranos calurosos o muy calurosos.
  - Alta amplitud térmica anual.
  - Precipitaciones variables, a menudo en verano.
- **Clima de montaña:**
  - Temperaturas frescas en todas las estaciones.
  - Inviernos fríos y nevados.
  - Veranos cortos y frescos.

– Precipitaciones abundantes, nieve frecuente en invierno.

La figura 3.4 a continuación ilustra la distribución de estos diferentes climas.



Figura 3.4: Mapa de Francia con sus diferentes climas

Fuente: https://www.kartable.fr/ressources/geographie/cours/le-climat/48659

Las configuraciones particulares han sido estudiadas en dos climas diferentes:

– un clima mediterráneo: Ajaccio,

– un clima oceánico: Rennes.

La elección de estos dos climas se basa en la disponibilidad que de datos meteorológicos para ambas ciudades mencionadas en los dos softwares de simulación STD.
Rennes está situada en una región donde se utiliza el bauge. Las propiedades térmicas del bauge son muy similares a las de la tapia.
En la región de Ajaccio actualmente no se construye con tierra cruda. La ausencia de ejemplos en esta región motivó la elección de la ciudad para mostrar si la construcción con tierra puede adaptarse a este clima.

3.2. Elección de las simulaciones mediante el método de plan de experiencia

En esta sección, se justificará la elección de un plan de experiencia para las simulaciones.
En primer lugar, dado el gran número de parámetros, si se desea ser exhaustivo y probar todas las soluciones para obtener las mejores, está claro que el número de simulaciones a realizar sería enorme. Aún más si se consideran parámetros como el grosor de la capa del material, de la capa aislante, su ubicación interior o exterior.

Además, simular directamente configuraciones existentes no permite generalizar los resultados, ni determinar la influencia de los parámetros de manera independiente, ni visualizar sus interacciones.
El método que se propone reduce el número de simulaciones y expone la influencia de cada parámetro a través de un enfoque estadístico: el plan de experiencia. [**6**].

3.2.1. ¿Qué es un plan de experiencia?

Un plan de experiencia es una lista de simulaciones que se han de realizar. El plan indica cuál debe ser el valor de los parámetros en un intervalo previamente definido, manteniendo constantes los demás factores. Luego, se mide una cantidad de salida para cada experimento.

Gracias a un software de planes de experiencia (en este caso, el software Ellistat, gratuito con licencia estudiantil), es posible construir el plan en sí. El plan seleccionado es el plan Latin Hypercube 50. La distribución de los parámetros en el intervalo elegido es tal que el conjunto de las simulaciones permite poner en manifiesto las correlaciones entre los materiales, además de determinar el impacto de cada parámetro sobre la cantidad de salida. Este plan permite dividir de manera eficiente todas las configuraciones posibles, y por lo tanto, obtener un conjunto de respuestas mucho más completo y explotable que el resultado que se habría obtenido con un conjunto de simulaciones elegidas aleatoriamente.

3.2.2. ¿Qué resultados?

El objetivo del plan de experiencia es realizar un modelo matemático del parámetro de salida (confort térmico o consumo de energía) en función de las variables de entrada (espesor del aislante o densidad del material). Después de medir el impacto de cada parámetro de entrada sobre el resultado (= la salida), el software realiza regresiones lineales que permiten visualizar si el modelo dado se ajusta bien a las simulaciones. Este primer paso permite verificar la coherencia de los resultados. Para verificar el modelo, se eligen algunas combinaciones de parámetros, se realizan las simulaciones para cada uno de estos casos y se comparan con el resultado real obtenido por la simulación (por ejemplo, la temperatura interior) con el que proporciona el modelo construido por el plan de experiencia. Si ambas coinciden, entonces se puede suponer que el modelo es válido.
Es posible representar gráficamente la evolución del parámetro de salida en función de los parámetros de la simulación. Así, se puede identificar cuál es el intervalo de valores para cada parámetro que permite optimizar nuestra magnitud de interés.

3.2.3. Elección de los parámetros

Aquí, la evolución de la temperatura interior, el confort térmico y el consumo de energía depende a priori de las propiedades físicas térmicas del material masivo del edificio, pero también del aislante utilizado. Es por eso que se eligen la capacidad térmica, la conductividad térmica y la densidad como parámetros. Además, la cantidad de material utilizada probablemente tendrá un gran impacto sobre la temperatura interior. Por lo tanto, se tienen en cuenta el grosor del material y del aislante.

Sin embargo, ¿por qué no elegir directamente los materiales y los aislantes mencionados anteriormente como parámetros? Es cierto que, al tomar las constantes físicas asociadas, nos encontraríamos simulando situaciones irreales que no corresponden a ninguna combinación real de un material y un aislante de la lista. Sin embargo, al combinar valores cuantitativos (por ejemplo, un grosor) con valores cualitativos (por ejemplo, un nombre de material), el software no lo entiende bien, ya que en realidad convierte los materiales en valores numéricos (n°1 a 6) y luego, por ejemplo, solicita realizar las simulaciones con el material 2,45. Esto obligaría a realizar promedios de materiales...

Para mantener la coherencia y una mejor legibilidad de los experimentos, parece que la mejor opción es elegir las constantes físicas como parámetros, ya que son completamente numéricas y caracterizan completamente cada material. Además, será más fácil interpretar los resultados en términos de pérdida térmica e inercia, ya que se conocen las representaciones físicas de estas constantes.

3.2.4. Elección del número de simulaciones

Una vez fijados todos los parámetros, queda determinar el número de simulaciones que se deben realizar para obtener el modelo que minimice lo más posible la incertidumbre, a la vez que se reduce el número de simulaciones.

Para ello, utilizamos el índice D-Optimal, que corresponde al determinante de las matrices de información del sistema. Cuanto más alto sea este índice, menor será la incertidumbre. Gracias a Ellistat, trazamos la evolución del índice D-Optimal en función del número de simulaciones. Elegimos entonces un número de simulaciones para el cual la curva es horizontal, es decir, se alcanza la meseta de convergencia del D-Optimal.

Además, un problema adicional que puede surgir durante el procesamiento de los datos y la construcción del modelo es el sobreajuste (overfitting). Para obtener un modelo cuadrático con interacciones de k parámetros de entrada, es necesario un mínimo de $1 + k + \frac{k*(k+1)}{2}$.
Es decir, en este caso, con $k = 8$, se deben realizar al menos 45 simulaciones.

Capítulo 4

Análisis de resultados

Esta sección reúne los resultados de las simulaciones realizadas con los programas Pléiades y Kozibu en el caso de las configuraciones particulares y del plan de experiencia.

4.1. Fase 1: Habitación vacía

En esta primera fase, el volumen estudiado está vacío, no hay dispositivos de calefacción o climatización y el volumen no está habitado. Las magnitudes de interés, es decir, los valores de salida de nuestras simulaciones numéricas, son la temperatura interior del edificio, la de sus muros y los índices PMV/PPD.

4.1.1. Configuraciones particulares

Se han simulado las ocho configuraciones particulares y se han obtenido los siguientes datos para Ajaccio y Rennes:

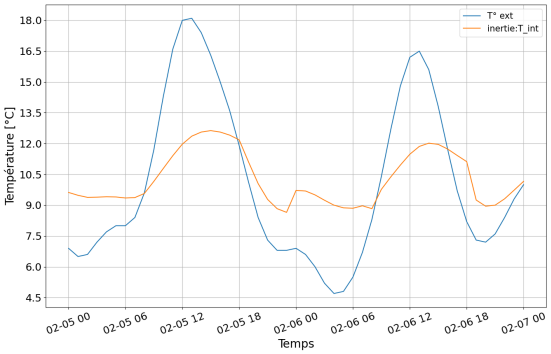
- la temperatura interior,
- la temperatura de los muros (solo en Kozibu),
- los indicadores PPD y PMV que dan información sobre las estrategias para frío o calor.

A partir de estos resultados, se han identificado 3 puntos para su análisis.

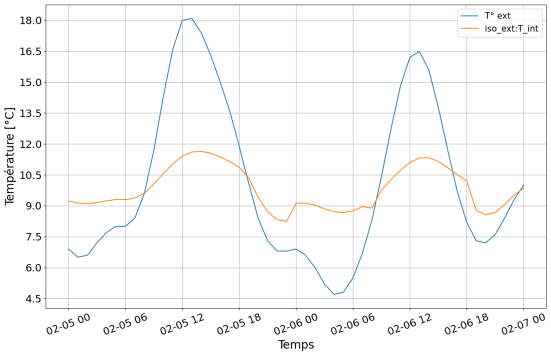
Desfase térmico y temperatura interior

Para observar si existe un desfase entre la temperatura interior y exterior en las distintas configuraciones, se ha trazado la evolución de estas dos temperaturas durante 2 días de invierno en el mes de febrero.

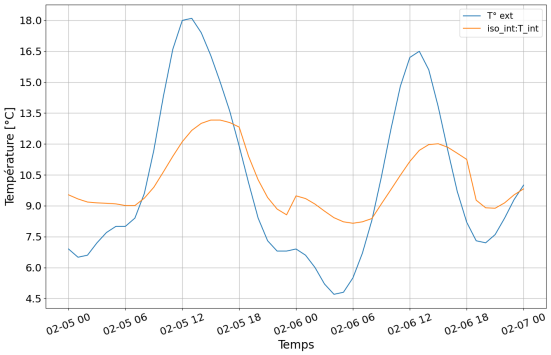
El desfase invernal para las configuraciones 1 (inercia), 3 (aislamiento interior) y 4 (aislamiento exterior) en Ajaccio se representa en la figura 4.1 a continuación.



(a) Inercia (configuración 1)



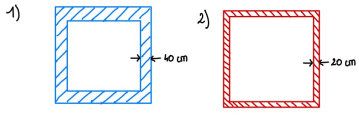
(b) Aislamiento exterior (conf. 4)



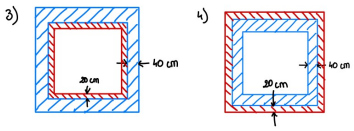
(c) Aislamiento interior (conf. 3)

Figura 4.1: Comparación del desfase en el mes de febrero en Ajaccio

Elaboración propia



(a) Inercia (conf.1) y Aislante (conf.2)



(b) Aislamiento interior (conf.3) y Aislamiento exterior (conf. 4)



(c) Leyenda

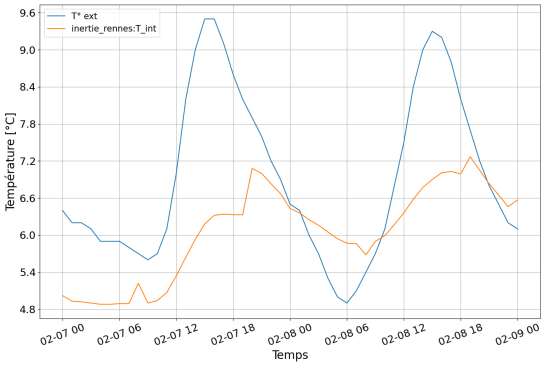
Figura 4.2: Recordatorio de las configuraciones

Elaboración propia

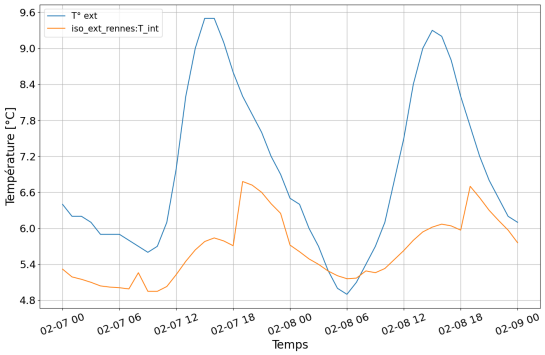
Pisé → Tapia ("Tierra apisonada"), Laine en bois → Lana de madera, Terre allégée → Tierra aligerada (mezcla de tierra con materiales ligeros como fibras vegetales)

Se puede observar en la primera configuración un desfase temporal de 3 horas que no se encuentra en la cuarta configuración. Esto ilustra claramente las propiedades de inercia de los materiales de tierra cruda como la tapia. Es notable cómo el aislamiento exterior anula las propiedades de inercia del material masivo, mientras que el aislamiento interior permite conservarlas; se observa nuevamente un desfase de 3 horas.

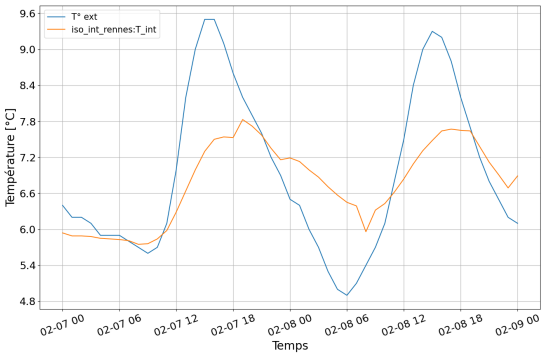
La figura 4.3 a continuación muestra los resultados obtenidos en Rennes.



(a) Inercia (conf. 1)



(b) Aislamiento exterior (conf. 4)



(c) Aislamiento interior (conf. 3)

Figura 4.3: Comparación del desfase en el mes de febrero en Rennes

Elaboración propia

Observamos que las configuraciones 1 y 3 presentan un desfase térmico de aproxi-

madamente 3 h. No se observa desfase en la configuración con aislamiento exterior. Sin embargo, la temperatura promedio es más baja y varía en un rango menor (de 5 a 6,6 °C, frente a 5,5 a 8 °C para el aislamiento interior).

También se puede analizar la evolución del desfase a lo largo del año.

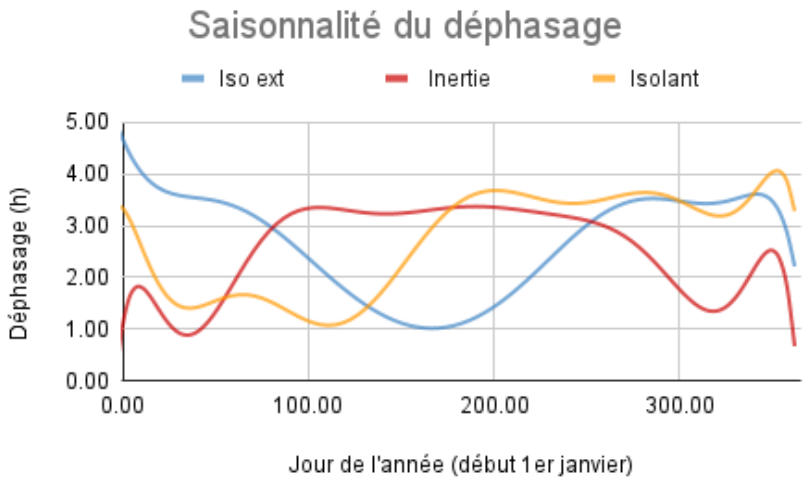


Figura 4.4: Evolución del desfase a lo largo del año para 3 configuraciones diferentes

Elaboración propia

Saisonnalité du déphasage → Estacionalidad del desfase

Eje vertical: Déphasage → Desfase

Eje horizontal: Jour de l'année (début 1er janvier) → Día del año (comenzando el 1 de enero)

El desfase de un edificio hecho 100 % en tierra cruda resulta claramente mejor que el de un edificio hecho 100 % en aislante o el de un edificio de tierra cruda aislado por el exterior. De hecho, el comportamiento ideal sería tener un desfase relativamente bajo en invierno para poder beneficiarse rápidamente de las ganancias solares. En verano, se prefiere un gran desfase para, o bien beneficiarse de los aportes energéticos nocturnos cuando el exterior es más fresco, o bien permitir a los habitantes evacuar las ganancias solares del día durante la noche, abriendo las ventanas.

También es interesante observar la evolución de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior a lo largo del año:

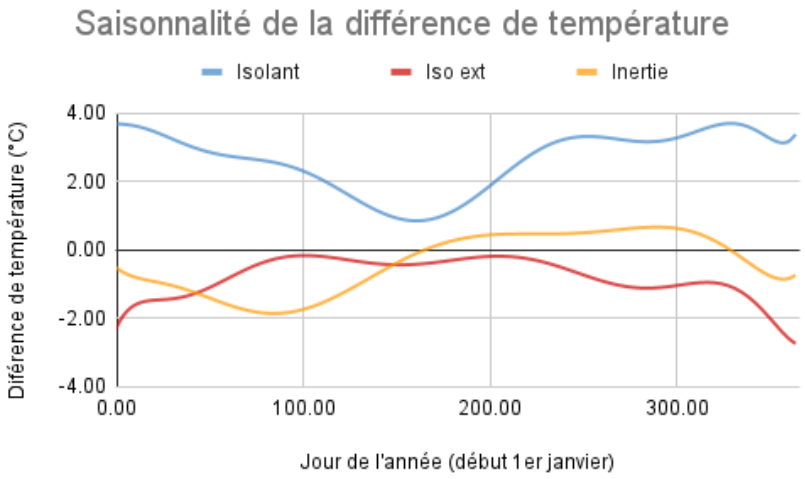


Figura 4.5: Evolución de la diferencia de temperatura a lo largo del año para 3 configuraciones diferentes

Elaboración propia

Saisonnalité de la différence de température → Estacionalidad de la diferencia de temperatura

Eje vertical: Différence de température (ºC) → Diferencia de la temperatura

Eje horizontal: Jour de l'année (début 1er janvier) → Día del año (comenzando el 1 de enero)

Primero, se observa un desfase estacional para las configuraciones de inercia y aislante. En efecto, el calor del verano parece calentar el interior solo a partir de finales del verano o comienzos del otoño. Sin embargo, en estas curvas no se observa un desfase estacional para la configuración aislamiento exterior. Es posible que la casa esté tan bien aislada (y con materiales pesados) que la aparición del calor veraniego se suavice durante el verano y otoño, hasta el punto de que este desfase no se aprecie en esta curva.

Se observa que la configuración 100 % aislante es preferible para el confort en invierno (sin calefacción), ya que en invierno hace más calor dentro de la vivienda que fuera. Sin embargo, también es necesario ser crítico con este resultado. En efecto, esta simulación indica que hará más calor en el interior que en el exterior, lo que puede deberse a que el edificio permite una mayor penetración del calor. Esto también significa que deja escapar el calor más fácilmente. Por lo tanto, si el edificio está habitado y calefaccionado, la energía invertida en calentar la habitación se perderá más fácilmente a través de paredes 100 % aislantes que con otro tipo de muro. La energía utilizada para la calefacción será entonces mayor con este tipo de muro que con otros.

Añadir aislamiento exterior a un muro de tapial permite disminuir la temperatura al final del verano (y suavizar globalmente la temperatura en primavera, verano y otoño). Las configuraciones 100 % tapial y tapial con aislamiento exterior permiten mejorar el confort en verano respecto a un muro aislante.

Los resultados obtenidos con el software Pléiades para la temperatura interior y el desfase se presentan en las tablas 4.1 y 4.2 a continuación:

Configuración (número)	**Desfase (h)**	**Diferencia de T (°C)**
Inercia (1)	2,70	−0,37
Aislante (2)	2,69	2,65
Aislamiento int. (3)	2,40	3,87
Aislamiento ext. (4)	2,54	−0,78
Aislamiento ext. + muro sur sin aislar (5)	2,50	−0,57
Aislamiento int. muro sur sin aislar (6)	2,16	−0,97
Corrector ext. (7)	2,37	−1,67
Corrector int. (8)	2,31	−1,56

Tabla 4.1: Desfase y diferencia de temperatura para cada configuración (Ajaccio) con Pléiades

Elaboración propia

Configuración (número)	**Desfase (h)**	**Diferencia de T (°C)**
Inercia (1)	2,69	−0,37
Aislante (2)	2,69	2,65
Aislamiento int. (3)	2,31	3,81
Aislamiento ext. (4)	2,39	−0,79
Aislamiento ext., muro sur sin aislar (5)	2,38	−0,58
Aislamiento int., muro sur sin aislar (6)	2,20	−0,97
Corrector ext. (7)	2,37	−1,67
Corrector int. (8)	2,31	−1,56

Tabla 4.2: Desfase y diferencia de temperatura para cada configuración (Rennes) con Pléiades

Elaboración propia

El desfase aquí se calcula como el desfase medio anual tomando la diferencia de tiempo diaria entre el momento de máxima temperatura exterior y la de máxima temperatura interior.

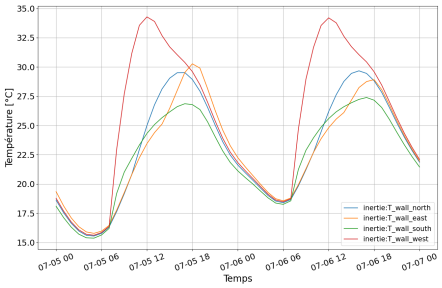
Se observa que el desfase no varía significativamente entre las diferentes configuraciones estudiadas. Como se menciona en **[11]**, "Las mediciones muestran una diferencia de 4 horas para el aumento de temperatura en el núcleo del muro-maqueta de 30 cm: este aumento se produce 4 horas más tarde de lo que predice el cálculo. Además, el modelo simplificado subestima este aumento en 2°C". Por tanto, la medición del desfase mediante simulaciones térmicas dinámicas no es muy pertinente.

En cuanto a las diferencias de temperatura (que corresponde al promedio anual de $T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}$, es decir, las temperaturas máximas diarias en el interior y exterior del edificio), se encuentran configuraciones con promedio positivo (configuraciones con aislamiento interior o completamente aisladas) y otras con promedio negativo. Como se explicó anteriormente, las configuraciones con diferencia de temperatura negativa son más adecuadas para climas cálidos, ya que permiten mantener una temperatura interior más baja que la exterior, lo cual es preferible en este tipo de clima. Cuanto mayor es la diferencia de temperatura (en valor absoluto), más eficaz es el edificio para reducir el efecto del calor exterior.En este caso, parece que las configuraciones con corrector térmico, tanto interior como exterior, son más eficaces que las demás.

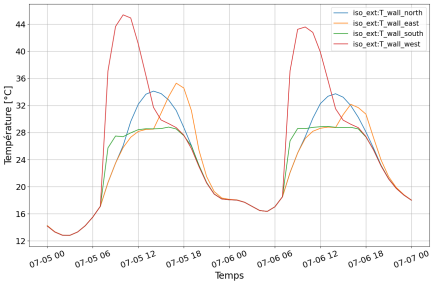
Las configuraciones con diferencia de temperatura positiva, por su parte, son preferibles para climas fríos. Pero, como ya se mencionó, hay que tener cuidado con sacar conclusiones apresuradas: también se debe considerar el gasto energético (lo cual se abordará en la parte sobre la célula habitada).

Temperatura de los muros y estrategia de aislamiento

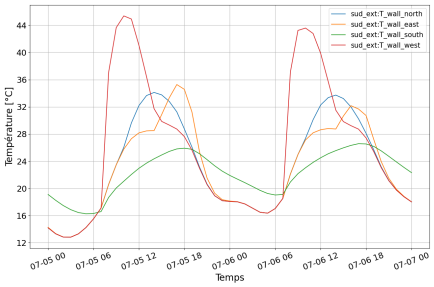
El segundo aspecto que se puede analizar es la temperatura de los muros. Esta varía según las configuraciones, como lo ilustra la figura 4.6.



(a) Inercia (configuración 1)



(b) Aislamiento exterior (configuración 4)



(c) Aislamiento exterior salvo muro sur (configuración 5)

Figura 4.6: Comparación de las temperaturas de los muros en el mes de julio en Ajaccio

Elaboración propia

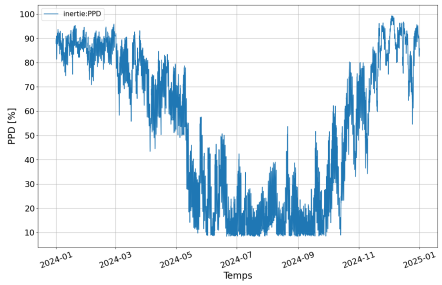
Se puede observar la influencia de la presencia de aislamiento sobre la temperatura de los muros. En las configuraciones 4 y 5, el aislamiento está colocado en el exterior respecto al tapial. En la configuración 5, el muro sur no está aislado. Con aislamiento, la temperatura del muro sur en el interior se mantiene elevada, mientras que sin este aislamiento es más baja. Se puede notar entonces el interés de no usar la misma composición de pared para todos los muros. Es necesario estudiar la orientación del edificio.

Sin embargo, podemos cuestionar estos resultados obtenidos con Kozibu. En efecto, el muro norte está más caliente que el muro sur y el muro que primero se calienta es el muro oeste, cuando cabría esperar que fuera el muro este con la salida del sol. Por ello, consideramos que estos resultados son discutibles, pero igualmente se puede observar la influencia de la composición de las paredes sobre las temperaturas de los muros. Según estos gráficos, parece que los muros se calientan gracias al sol que entra por las aberturas. Esto puede explicarse por el hecho de que no hay tabiques interiores. Para profundizar en el estudio, sería necesario añadir divisiones interiores al edificio.

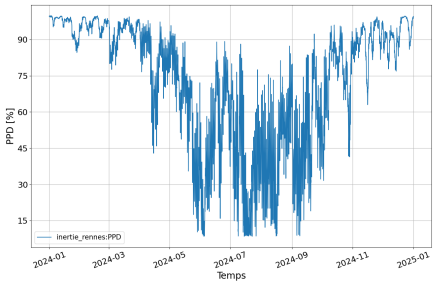
Comparación de los dos climas

Por último, se ha podido evidenciar la importancia de adaptar la estrategia térmica al clima. En efecto, hemos realizado simulaciones en Rennes y Ajaccio y los resultados varían bastante según las configuraciones.

Las figuras 4.7 y 4.8 a continuación ilustran las diferencias en confort térmico:



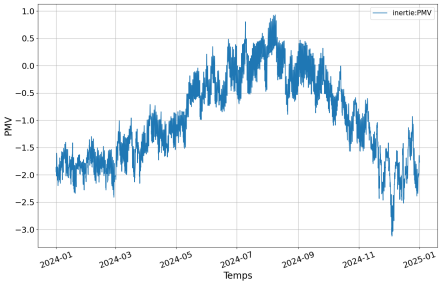
(a) Inercia (configuración 1) Ajaccio



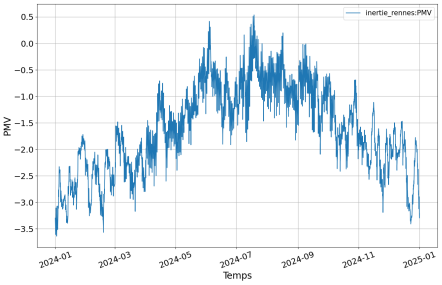
(b) Inercia (configuración 1) Rennes

Figura 4.7: Comparación de los índices PPD en Rennes y Ajaccio a lo largo del año

Elaboración propia



(a) Inercia (configuración 1) Ajaccio



(b) Inercia (configuración 1) Rennes

Figura 4.8: Comparación de los índices PMV en Rennes y Ajaccio a lo largo del año

Elaboración propia

Con el clima de Rennes, se debería adoptar una estrategia para reducir la sensación de frescor, mientras que en Ajaccio se debería reducir la sensación de calor. El índice PMV es generalmente más bajo en Rennes que en Ajaccio, lo cual significa que las personas tienden a tener más frío en Rennes. Sin embargo, el PPD en Ajaccio es, a lo largo del año, más bajo que en Rennes. Esto significa que una configuración de edificio con inercia (configuración 1) sería más adecuada en Ajaccio que en Rennes. No obstante, esto no significa que esta configuración no sea relevante para Rennes.

Así, la configuración más adecuada para una región no será necesariamente la mejor para otra, en función del clima de cada una. Retomaremos este punto cuando estudiemos la célula habitada.

4.1.2. Modelo estadístico

A partir de las simulaciones realizadas en Ajaccio siguiendo el plan de experimentación dado en el Anexo C, fue posible construir modelos utilizando el software Matlab mediante

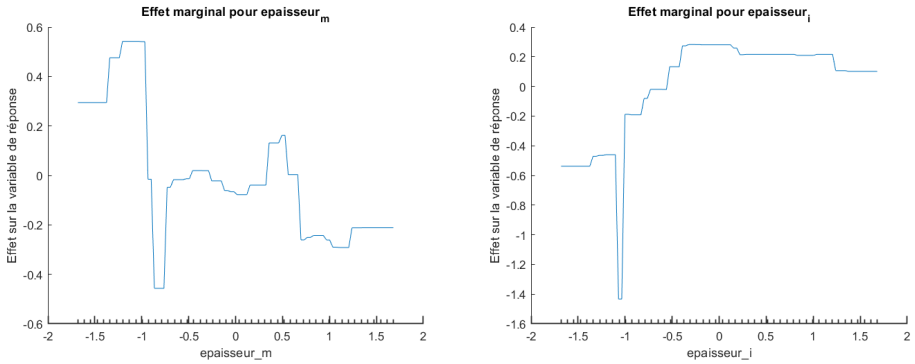
dos métodos:

- un modelo de construcción paso a paso (stepwise),
- un modelo aditivo generalizado (GAM).

Estos modelos permiten determinar cuáles son los parámetros que tienen un impacto significativo sobre la magnitud de interés, que en este caso se toma como el grado-hora de incomodidad (DH).
Analizando los valores de p_{values}, es posible determinar que las variables significativas son:

- la capacidad térmica másica del material portante,
- el espesor del material portante,
- el espesor del aislante.

El modelo también pone en evidencia interacciones cruzadas y, por lo tanto, no es lineal. El modelo GAM permite visualizar mejor la influencia de los parámetros, como se ilustra en la figura 4.9. Para construir el modelo, es necesario normalizar los parámetros de entrada y de salida con el fin de comparar, sumar y multiplicar magnitudes de la misma dimensión. Así, las magnitudes mostradas tienen escalas comprendidas entre -2 y 2. Por lo tanto, no se debe intentar leer en estos gráficos un valor literal, sino más bien interpretar la tendencia en relación con los límites inferior y superior. La ordenada representa aquí la magnitud de salida —el grado-hora de incomodidad (DH), también normalizado.



(a) Espesor del material (b) Espesor del aislante

Figura 4.9: Variación del grado-hora de incomodidad en función de diferentes parámetros de entrada.

Elaboración propia

Eje vertical: Efecto sobre la variable de repuesta (en este caso, DH)
Eje horizontal: a la izquierda espesor del material a la derecha espesor del aislante

Según la figura 4.9, el confort aumenta con el espesor del material másico. Esto parece coherente, ya que dicho parámetro aumenta la inercia y tiende a suavizar las curvas de temperatura, lo cual reduce los picos de incomodidad. Según el modelo, un aumento en el espesor de la capa de aislante debería aumentar la incomodidad y no reducirla. Esta tendencia, en principio contraria a la esperada, no puede explicarse con los datos actuales. Se volverán a discutir este resultado en la siguiente subsección dedicada al estudio de la celda habitada.

4.2. Fase 2: Habiación ocupada

Durante esta fase, se estudió el mismo volumen, pero añadiendo sistemas de calefacción, climatización y los ocupantes. Los ajustes de las simulaciones se modificaron para tener en cuenta la actividad de una familia de cuatro personas (dos adultos y dos niños). La temperatura de consigna se fijó en 18°C en invierno y 26°C en verano (es decir, en caso de estar por debajo de 18°C en invierno o por encima de 26°C en verano se activarían los sistemas de calefacción y climatización). Las magnitudes de interés son el consumo de energía y los indicadores de confort térmico.

Escenarios de ocupación

En todas las simulaciones de esta fase realizadas con KoZiBu, se considera un escenario de ocupación de la vivienda. Este fue elegido para corresponder con la vida habitual de una familia.
Modelamos la presencia de dos adultos y dos niños. La diferencia en el software radica en la potencia térmica aportada y en el nivel de humedad generada. Se considera una situación en la cual los cuatro ocupantes de la casa la abandonan cada día de la semana (de lunes a viernes) a las 9h. Los niños regresan a las 16h y los adultos a las 18h. Los fines de semana, los cuatro ocupantes permanecen constantemente en la casa.

4.2.1. Configuraciones particulares

Se simularon las ocho configuraciones particulares y se obtuvieron los siguientes datos para Ajaccio y Rennes:

- la temperatura interior,
- el consumo de energía,
- los indicadores PPD y PMV.

Con estos resultados, se plantearon dos puntos para ser analizados: el estudio del consumo energético y el confort térmico.

Consumo energético

Los resultados obtenidos con el software Pléiades para el consumo se presentan en las tablas 4.3 (Ajaccio) y 4.4 (Rennes) a continuación:
Los resultados obtenidos muestran que el consumo energético anual en Ajaccio es notablemente más bajo que en Rennes, principalmente debido a su clima mediterráneo más suave.

Para minimizar el consumo energético, la mejor configuración parece ser el aislamiento completo por el exterior. Sin embargo, al optar por el aislamiento exterior sin aislar el muro sur, el consumo solo aumenta ligeramente.

De hecho, en Ajaccio, el consumo total con un aislamiento exterior completo es de 11,978 kWh, mientras que con aislamiento exterior sin el muro sur aislado, es de 12,459 kWh. El aumento es entonces del 4.02 %.

Configuración	Cons. calefacción (kWh)	Cons. aire acondicionado (kWh)	Cons. total (kWh)
Inercia (1)	14,452	194	14,646
Aislante (2)	12,642	537	13,179
Aislamiento int (3)	12,821	710	13,531
Aislamiento ext (4)	11,893	85	11,978
Aislamiento ext + muro sur no aislado (5)	12,346	113	12,459
Aislamiento int muro sur no aislado (6)	12,432	512	12,944
Corrector ext (7)	13,285	132	13,417
Corrector int (8)	13,626	471	14,097

Tabla 4.3: Análisis de configuraciones particulares: habitación ocupada en Ajaccio con Pléiades

Elaboración propia

Configuración	Cons. calefacción (kWh)	Cons. aire acondicionado (kWh)	Cons. total (kWh)
Inercia (1)	20,875	300	21,175
Aislante (2)	16,294	544	16,838
Aislamiento int (3)	16,386	638	17,024
Aislamiento ext (4)	15,544	134	15,678
Aislamiento ext + muro sur no aislado (5)	16,396	165	16,561
Aislamiento int muro sur no aislado (6)	16,896	459	17,355
Corrector ext (7)	18,377	227	18,604
Corrector int (8)	18,701	424	19,125

Tabla 4.4: Análisis de configuraciones particulares: habitacion ocupada en Rennes con Pléiades

Elaboración propia

En Rennes, el consumo total con aislamiento exterior completo es de 15,678 kWh, y con aislamiento exterior sin el muro sur aislado, alcanza los 16,561 kWh. El aumento es entonces del 5.64 %.

Así, aunque el impacto es ligeramente mayor en Rennes, el aislamiento exterior sin el muro sur sigue siendo una opción eficaz para mantener un bajo consumo energético, reduciendo al mismo tiempo la cantidad de aislante utilizado y, por tanto, el coste de instalación y mantenimiento.

Los datos de consumo de calefacción y de climatización también se determinaron con KoZiBu, con el fin de discutir los resultados obtenidos por Pléiades por un lado, y observar una situación más realista, con equipos cuya potencia está limitada a 10 kW, que es un valor estándar para una vivienda de 100 m^2.

Configuración	Consumo calefacción [kWh]	Cons. aire acondicionado [kWh]	Consumo total [kWh]
Inercia (1)	13,357	39	13,396
Aislante (2)	9750	89	9839
Aislamiento int. (3)	9534	65	9599
Aislamiento ext. (4)	9197	16	9213
Aislamiento ext. + muro sur no aislado (5)	10,295	27	10,322
Aislamiento int. + muro sur no aislado (6)	10,231	27	10,258
Corrector exterior (7)	9599	14	9613

Tabla 4.5: Consumo de las configuraciones particulares — celda habitada en Ajaccio con KoZiBu

Elaboración propia

Configuración	Consumo calefacción [kWh]	Cons. aire acondicionado [kWh]	Consumo total [kWh]
Inercia (1)	23,316	0	23,316
Aislante (2)	16,794	6	16,800
Aislamiento int. (3)	16,498	3	16,501
Aislamiento ext. (4)	16,121	0	16,121
Aislamiento ext. + muro sur no aislado (5)	17,834	0	17,834
Aislamiento int. + muro sur no aislado (6)	17,677	0	17,677
Tierra aligerada (7)	16,934	0	16,934

Tabla 4.6: Consumo de las configuraciones particulares — celda habitada en Rennes con KoZiBu

Elaboración propia

Se observa en primer lugar que el consumo es mayor en Rennes que en Ajaccio debido a su clima más suave. Además, la configuración de Inercia es en ambos casos la peor en cuanto a consumo. No obstante, varias configuraciones resultan interesantes:

- las mejores configuraciones son el aislamiento exterior e interior,
- la configuración en la que el muro sur no está aislado pero posee un corrector térmico también es interesante, observándose un aumento del consumo de aproximadamente un 4 %.

Por otra parte, los consumos de calefacción y climatización dan indicaciones sobre las estrategias que deben adoptarse para cada clima. El consumo en climatización es casi nulo en Rennes, por lo que se debe adoptar una estrategia centrada en el calor. En Ajaccio, sí se percibe la necesidad de climatización, siendo por tanto necesario implementar una estrategia de enfriamiento para el verano. Sin embargo, se puede discutir el hecho de que los datos de climatización son muy bajos en comparación con los de calefacción en Ajaccio.

Confort térmico

Con Pléiades, se simulan las distintas configuraciones con una potencia infinita de calefacción y climatización.
Para comparar todas las configuraciones desde el punto de vista del confort térmico, se definen dos magnitudes:

- la suma en valor absoluto del PMV,
- el número de horas en las que el PPD es superior al 10 %.

El valor de estas magnitudes para las 8 configuraciones en Rennes y Ajaccio se da en la tabla 4.7 a continuación.

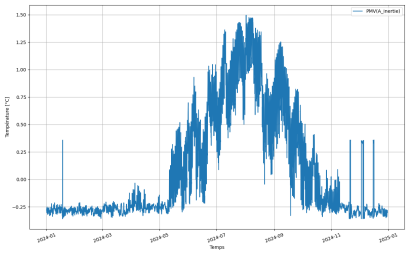
Configuración	Rennes			Ajaccio		
	Suma PMV en valor absoluto	Número de horas PPD > 10 %	DH	Suma PMV en valor absoluto	Número de horas PPD > 10 %	DH
Inercia (1)	3595	2093	-	2908	1104	-
Aislante (2)	3396	1837	-	2778	1015	-
Aislamiento interior (3)	3420	1861	-	2791	1037	-
Aislamiento exterior (4)	3296	1812	-	2672	911	-
Aislamiento ext. + muro sur no aislado (5)	3383	1902	-	2735	970	-
Aislamiento int. + muro sur no aislado (6)	3460	1926	-	2810	1055	-
Corrector exterior (7)	3359	1881	-	2721	953	-
Corrector interior (8)	3372	1888	-	2731	966	-

Tabla 4.7: Resumen de los indicadores de confort térmico para Ajaccio y Rennes con una potencia infinita de calefacción y climatización

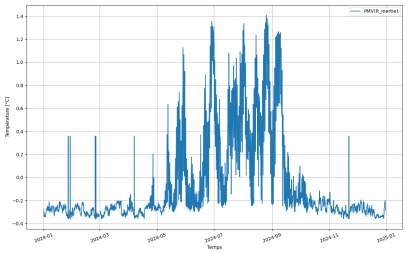
Elaboración propia

Se observa que la configuración de Inercia es la peor en términos de confort tanto en Ajaccio como en Rennes. Por otro lado, no se observan diferencias muy significativas entre las demás configuraciones en cuanto a los índices PPD y PMV. Sin embargo, los índices son globalmente más bajos en Ajaccio que en Rennes. Esto puede explicarse por el clima mediterráneo más suave de Ajaccio en comparación con el clima oceánico de Rennes.

La evolución de los índices PPD y PMV en Ajaccio y Rennes se muestra en las figuras 4.10 y 4.11 a continuación.



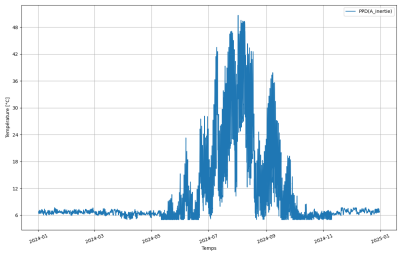
(a) PMV Inercia (configuración 1) Ajaccio



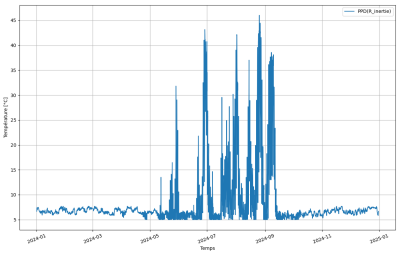
(b) PMV Inercia (configuración 1) Rennes

Figura 4.10: Comparación de los índices PMV durante el año

Elaboración propia



(a) PPD Inercia (configuración 1) Ajaccio



(b) PPD Inercia (configuración 1) Rennes

Figura 4.11: Comparación de los índices PPD durante el año

Elaboración propia

Se observa que el disconfort es más pronunciado en verano tanto en Rennes como en Ajaccio. Sin embargo, dado que la potencia de calefacción y climatización es infinita, estos resultados no reflejan fielmente la realidad.

Se realizaron simulaciones en la misma habitación con KoZiBu. La diferencia radica en la definición de las potencias de calefacción y climatización, que fueron limitadas a $10kW$, un valor estándar recomendado por los proveedores de este tipo de equipos para una vivienda de $100m^2$. Considerando los mismos criterios definidos anteriormente y utilizados con Pléiades, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 4.8.

Configuración	Ajaccio			Rennes		
	Suma PMV en valor absoluto	Número de horas PPD > 10 %	DH	Suma PMV en valor absoluto	Número de horas PPD > 10 %	DH
Inercia (1)	3660	8275	.	4999	8681	.
Aislante (2)	3395	8270	.	4307	8585	.
Aislamiento interior (3)	3353	8269	.	4384	8623	.
Aislamiento exterior (4)	3258	8162	.	4578	8733	.
Aislamiento ext. + muro sur sin aislar (5)	3307	8240	.	4514	8687	.
Aislamiento int. + muro sur sin aislar (6)	3317	8243	.	4580	8695	.
Corrector exterior (7)	3301	8166	.	4666	8733	.

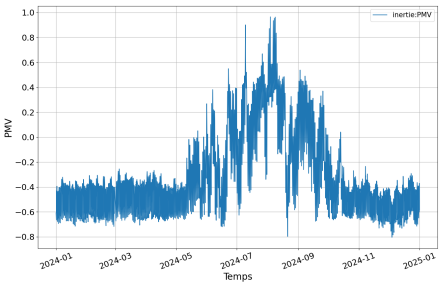
Tabla 4.8: Resumen de los indicadores de confort térmico para Ajaccio y Rennes en KoZiBu

Elaboración propia

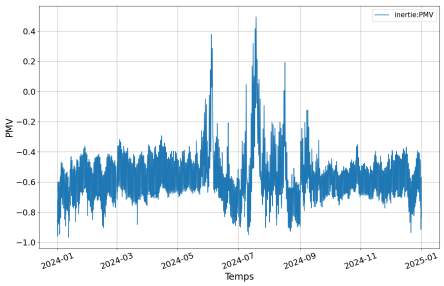
Para ambas ciudades y en todas las configuraciones, se observa que el número de horas en las que el PPD es > al 10 % es muy alto y corresponde casi al número total de horas de un año. Esto significa que casi siempre habrá al menos un 10 % de personas que sentirán disconfort térmico en estas configuraciones. Esto puede explicarse por la elección de una temperatura de activación de la calefacción de 18°C, que ya es relativamente baja y puede generar incomodidad en algunas personas.

En cuanto al criterio PMV, se observa que en Ajaccio la configuración con inercia es la más desfavorable en comparación con las demás, que son bastante similares entre sí. La misma situación se da en Rennes, donde la configuración con tierra aligerada también resulta menos interesante que las otras.

La evolución de los índices PPD y PMV en Ajaccio y Rennes se muestra en las figuras 4.12 y 4.13.



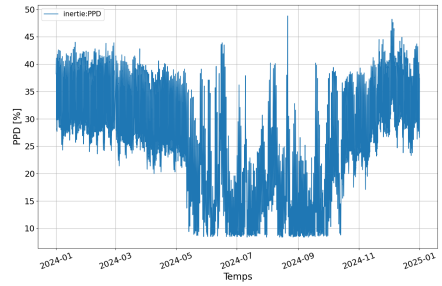
(a) PMV Inercia (configuración 1) Ajaccio



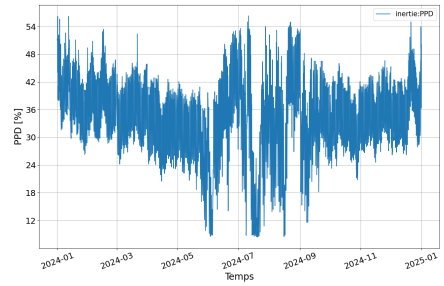
(b) PMV Inercia (configuración 1) Rennes

Figura 4.12: Comparación de los índices PMV durante el año

Elaboración propia



(a) PPD Inercia (configuración 1) Ajaccio



(b) PPD Inercia (configuración 1) Rennes

Figura 4.13: Comparación de los índices PPD durante el año

Elaboración propia

Se observa que durante la mayor parte del año el PMV es aproximadamente -0,5 tanto en Ajaccio como en Rennes, lo que indica una ligera sensación de frío. Durante el verano, la sensación térmica pasa a ser de calor, de manera más pronunciada en Ajaccio, lo cual es coherente. A pesar de la presencia de calefacción, al estar limitada en potencia, el edificio por sí solo no es capaz de garantizar un confort térmico satisfactorio durante todo el año.

4.2.2. Modelo estadístico

A partir de las simulaciones realizadas según el plan de experiencia dado en el Anexo C, fue posible construir modelos que permiten determinar cuáles son los parámetros que tienen un impacto significativo sobre nuestras magnitudes de interés.

Consumo de energía

En un primer momento, nuestra magnitud de interés es el consumo de energía. Analizando los p_{values}, las variables significativas son:

- la densidad del material
- la capacidad térmica del material

– la conductividad térmica del material

– el espesor del material

– la densidad del aislante

– la conductividad térmica del aislante

– el espesor del aislante

El modelo observa numerosas interacciones entre estas variables significativas. Por lo tanto, se espera una influencia compleja de estos parámetros sobre el consumo del habitáculo. El lector puede remitirse al anexo F para obtener la evolución del consumo en función de estos parámetros. Aquí se detalla el caso del espesor del aislante:

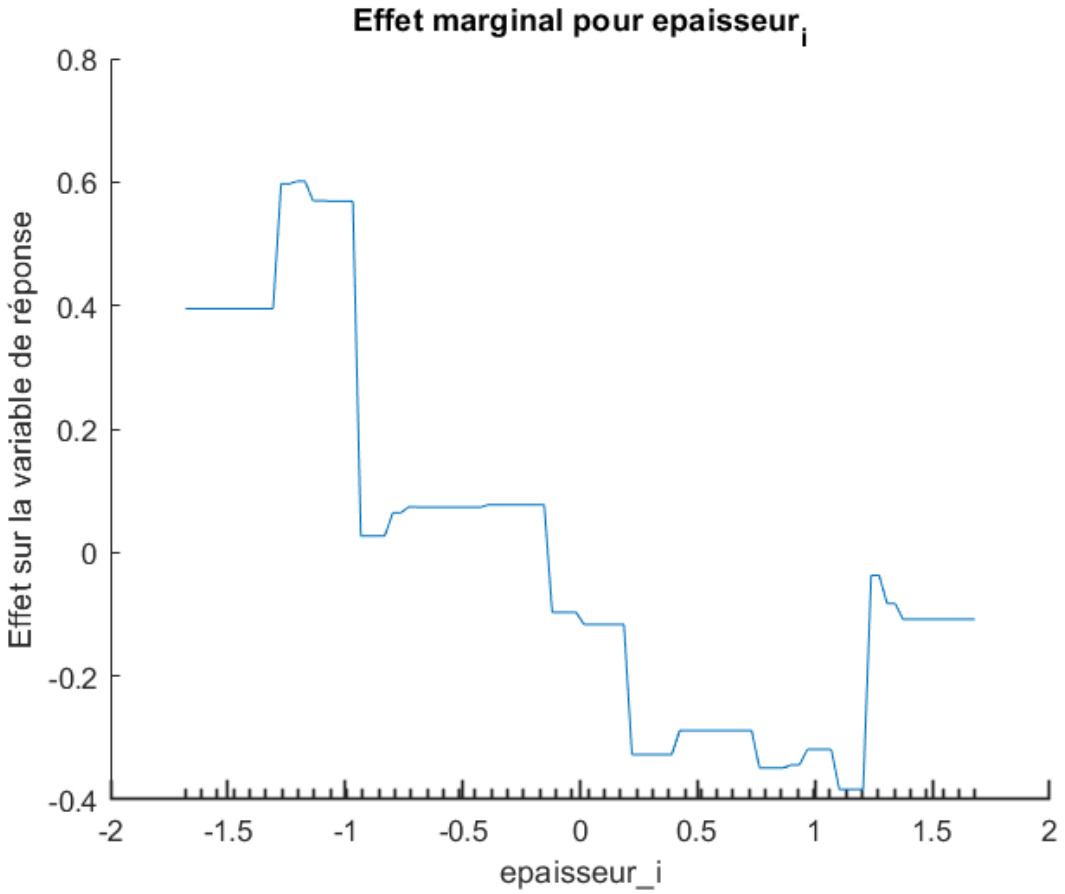


Figura 4.14: Influencia del espesor del aislante sobre el consumo

Elaboración propia

Título: Efecto para el espesor
Eje vertical: Efecto sobre la variable de repuesta (consumo de energía)
Eje horizontal: Espesor del aislante

La figura 4.14 muestra la evolución del consumo en función del espesor de la capa aislante, elegido entre 15 y 30 cm. Se observa que el consumo disminuye fuertemente hasta alcanzar un espesor límite, después del cual los efectos sobre el consumo se vuelven más

limitados. A partir del gráfico, se deduce un espesor límite de 18 cm para una reducción significativa del consumo; este consumo puede reducirse aún más aumentando el espesor hasta 23 cm. Más allá de este límite, no parece útil aumentar el espesor del aislante.

De igual manera, se determinan intervalos de valores interesantes para las magnitudes consideradas como influyentes sobre el consumo.

- Espesor del material: fuerte disminución del consumo a partir de 35 cm
- Densidad del material: fuerte disminución del consumo a partir de 1810 kg/m^3
- Capacidad térmica específica: aumento del consumo para un valor superior a 750 $J.kg^{-1}.K^{-1}$
- Densidad del aislante: disminución lineal, idealmente superior a 160 kg/m^3

Las desviaciones del modelo con respecto a los valores simulados se muestran en la figura 4.15. Esto permite concluir que existe una buena correlación entre nuestro modelo y los datos simulados. Por lo tanto, las estimaciones predichas deberían ser fiables.

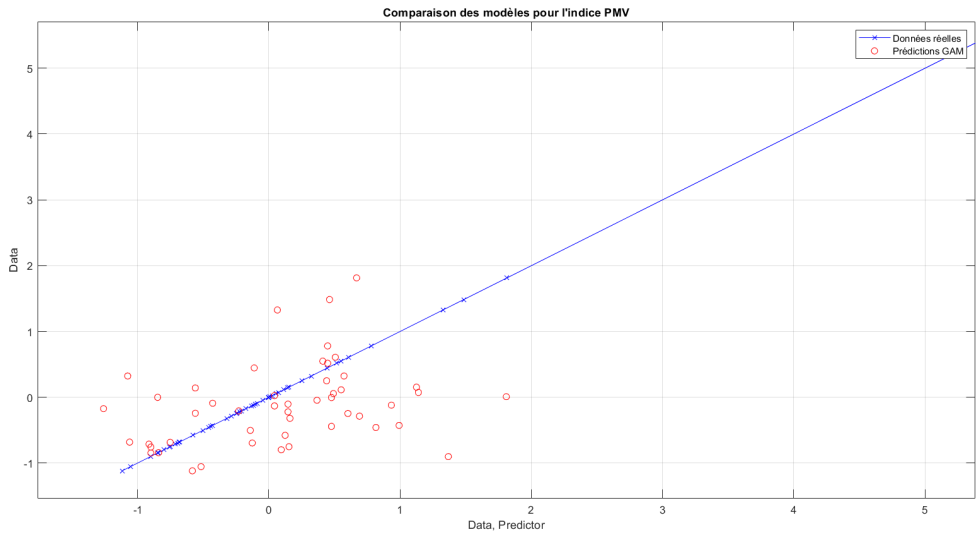


Figura 4.15: Comparación del modelo de consumo con respecto a los valores simulados

Elaboración propia

En azul: Datos reales
En rojo: Predicciones GAM

Confort térmico

En un segundo momento, nuestras magnitudes de interés son los índices PPD y PMV.

Al analizar los p_{values}, las variables significativas para el PMV y el PPD son:

– la densidad del material

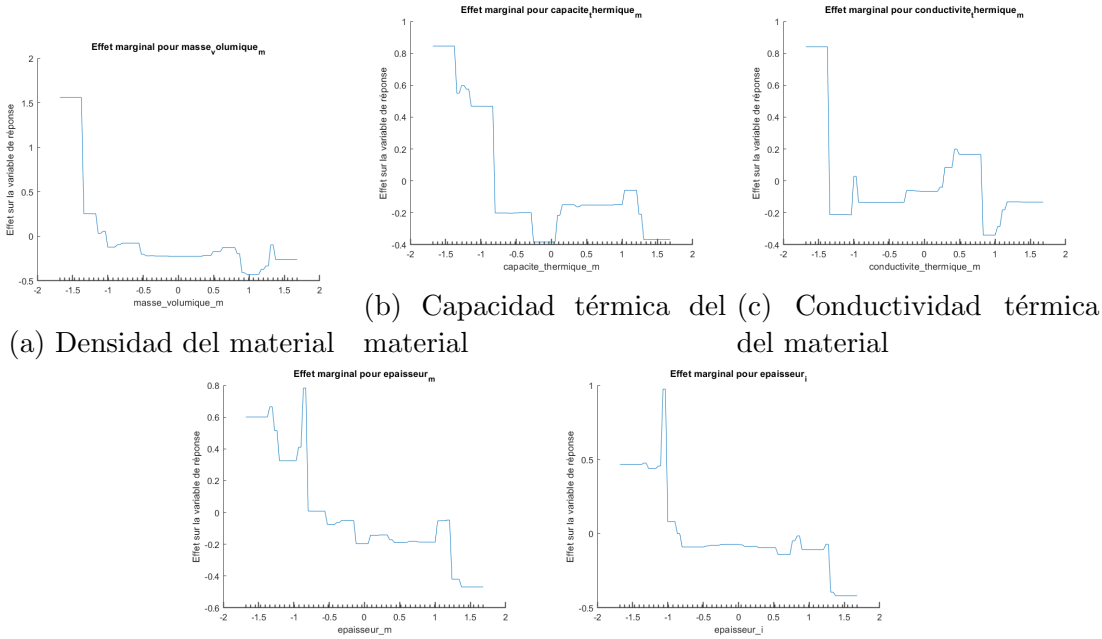
– la capacidad térmica del material

– la conductividad térmica del material

– el espesor del material

– el espesor del aislante

La influencia de los parámetros no es lineal, el modelo GAM permite visualizar esta influencia, como lo ilustra la figura G.1 para el índice PMV. Se observan resultados similares para el índice PPD, cuyas figuras están disponibles en el anexo E.



(a) Densidad del material (b) Capacidad térmica del material (c) Conductividad térmica del material

(d) Espesor del material (e) Espesor del aislante

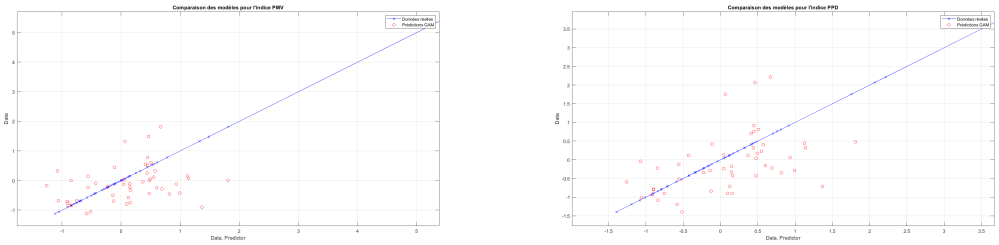
Figura 4.16: Índice PMV en función de los parámetros de entrada significativos

Elaboración propia

Asimismo, se pueden observar tendencias decrecientes para los índices PPV y PMD al aumentar parámetros como la densidad, el espesor del aislante o del material. A partir de las figuras, se determinan intervalos interesantes para estos parámetros de entrada con el fin de minimizar el disconfort:

- Densidad del material: fuerte disminución del disconfort a partir de 1475 kg/m^3
- Capacidad térmica específica: fuerte disminución del disconfort a partir de 1250 $J.kg^{-1}.K^{-1}$
- Conductividad térmica: disminución del disconfort a partir de 0.28 $W/m.K$
- Espesor del material: meseta a partir de 35 cm
- Espesor del aislante: meseta a partir de 20 cm

Las desviaciones del modelo con respecto a los valores simulados se muestran en la figura 4.17. Nuevamente, el modelo parece estar bastante cercano a los resultados de nuestras simulaciones.



(a) Índice PMV (b) Índice PPD

Figura 4.17: Comparación de los modelos que tienen como salida los índices PMV y PPD con respecto a los valores simulados

Elaboración propia

En azul: Datos reales
En rojo: Predicciones GAM

4.3. Sintesis de resultados

A partir de estos diferentes estudios, se obtienen las siguientes conclusiones:
Con respecto al material, se recomienda priorizar un material que posea una alta capacidad térmica así como una elevada densidad. A priori, parece que una conductividad térmica elevada podría mejorar el confort (índices PPD y PMV) en detrimento del consumo energético. En ambos casos, el espesor del muro principal tiene un efecto ampliamente positivo.

En lo que respecta al aislante, el parámetro más significativo es su espesor. Esto significa que, dentro del rango de aislantes de origen biológico comúnmente utilizados, la elección del aislante en sí parece menos importante que el aumento del espesor de la capa aislante para mejorar el confort. En cambio, para reducir el consumo energético, la densidad del aislante debe maximizarse.

En cuanto a la posición relativa del aislante y del material con masa térmica, las configuraciones particulares han mostrado que las propiedades de inercia del material masivo se aprovechan mejor cuando no hay aislante o cuando éste se coloca en el interior. Sin embargo, la aislación interior es compleja con materiales a base de tierra cruda. En efecto, es crucial que el aislante permita evacuar la humedad sin generar condensación. No obstante, estas configuraciones (1 y 3) son las menos eficaces en términos de consumo energético.

Finalmente, ninguna de las configuraciones particulares probadas cumple con los criterios impuestos por la RE2020 [**9**] en lo que respecta al consumo energético. En efecto, el consumo de energía primaria por unidad de superficie y por año no debe exceder los 75 $kWh/(m^2.an)$. Sin embargo, para nuestro edificio de 100 m^2, todas las configuraciones superan los 9000 kWh por año, es decir, un consumo de energía primaria de 90 $kWh/(m^2.an)$. Por lo tanto, estas configuraciones no pueden ser utilizadas tal como están en Ajaccio y Rennes.

Capítulo 5

Conclusiones

En el marco de este proyecto desarrollado en Centrale Lyon y patrocinado por *amàco*, se llevó a cabo un estudio sobre estrategias térmicas para la integración de materiales a base de tierra cruda en la edificación. Esta investigación se enmarca dentro de una visión de construcción sostenible, con el objetivo de reevaluar el potencial de dichos materiales en el contexto actual.

Tras una revisión de las propiedades térmicas de los principales tipos de tierra cruda y de las técnicas constructivas asociadas, se implementó una metodología de simulación térmica dinámica utilizando los programas Kozibu y Pléiades. Se analizaron diversos escenarios y configuraciones, complementados con un estudio estadístico basado en un plan de experiencia, con el fin de evaluar el impacto sobre el confort térmico y el consumo energético.

Los resultados obtenidos indican que los materiales con alta capacidad térmica y densidad, combinados con un espesor significativo de los muros, mejoran notablemente el confort térmico. Asimismo, una conductividad térmica elevada puede contribuir al confort, aunque a costa de un mayor consumo energético. En cuanto al aislante, se observó que el espesor influye de manera determinante en el confort, mientras que una mayor densidad ayuda a reducir el consumo.

Algunas configuraciones favorecen la inercia térmica, aunque resultan menos eficaces desde el punto de vista energético. Ninguna de las configuraciones analizadas cumple con los requisitos establecidos por la normativa RE2020 para los climas considerados.

Este estudio permitió avanzar en la comprensión del comportamiento térmico de los materiales a base de tierra cruda, así como en el análisis estadístico de sus efectos. Asimismo, evicencia la pertinencia de emplear materiales locales y poco transformados en un enfoque de construcción más sostenible.

En definitiva, la tierra cruda presenta un elevado potencial para mejorar el confort térmico con un impacto ambiental reducido. No obstante, su aplicación requiere una implementación cuidadosa y decisiones técnicas precisas que permitan cumplir con las exigencias actuales. Los resultados abren nuevas perspectivas para una reintegración informada y eficaz de estos materiales en la arquitectura contemporánea.

5.1. Perspectivas del proyecto

Este proyecto abre varias perspectivas interesantes para profundizar en el estudio de estrategias térmicas de implementación de materiales a base de tierra cruda. Entre las

principales líneas a explorar, pueden considerarse diversos ejes de mejora y ampliación del análisis.

En primer lugar, resultaría pertinente incorporar habitaciones y tabiques en las simulaciones, con el fin de representar de manera más realista la diversidad de configuraciones presentes en una vivienda. Esto permitiría afinar los resultados en términos de rendimiento térmico y optimización de los espacios interiores, considerando la disposición de las estancias y las separaciones internas.

A continuación, para ampliar el alcance del estudio, sería importante realizar simulaciones correspondientes a los otros dos climas no estudiados: el clima montañoso y el continental. Estos presentan condiciones específicas que pueden influir en el comportamiento térmico de los materiales, así como en las necesidades de calefacción y refrigeración, afectando por tanto la pertinencia de las estrategias de implementación.

Un análisis estacional más detallado, que tenga en cuenta las variaciones de temperatura y humedad, permitiría comprender mejor las necesidades de calefacción y refrigeración a lo largo del año. Este análisis podría incluir datos más precisos sobre las demandas energéticas estacionales, así como considerar la presencia de los ocupantes y la utilización de los espacios. Al modelar perfiles de ocupación según la estación (por ejemplo, un aumento de la presencia en interiores durante los meses fríos), sería posible optimizar la gestión térmica y energética de los edificios en función del comportamiento de los usuarios.

Por último, un aspecto importante de este proyecto fue la utilización de un plan de experiencia y un estudio estadístico para analizar los resultados de las simulaciones térmicas. Sin embargo, como se ha observado, aunque los modelos predichos se aproximan razonablemente a los resultados simulados, aún pueden mejorarse. Una forma sencilla de lograrlo consiste en simular nuevos puntos y añadirlos al modelo, lo que permitiría enriquecerlo, suavizar las curvas, evitar variaciones no naturales y, en definitiva, obtener resultados más fiables, precisos y fácilmente utilizables. Para ello, el uso de un software de simulación térmica dinámica que pueda ser operado de forma automática e iterativa supondría un ahorro de tiempo considerable.

Más allá de los resultados obtenidos, este proyecto demuestra que el interés creciente por enfoques constructivos más respetuosos con el medioambiente es fundamental.Además, destaca la pertinencia de seguir investigando en torno a los materiales naturales como la tierra cruda. Su potencial en términos de sostenibilidad, confort y valorización de saberes locales justifica plenamente la continuación de este tipo de estudios. Profundizar en estas líneas de investigación permitirá no solo optimizar su implementación técnica, sino también contribuir activamente a la transición ecológica del sector de la construcción.

Capítulo 6

Bibliografia

Bibliografía

[1] Amàco: *Ressources amaco*. Disponible à : `https://ressources.amaco.org/`. Consulté le 8 Octobre 2024.

[2] Anger Romain, Cloquet Basile, Couvreur Lucile, Doat Patrice, Fontaine Laetitia, Moevus-Dorvaux Mariette: *Béton d'Argile environnemental*. Brochure, 2010-2013. Consulté le 15 Octobre 2024.

[3] Auger Bertrand, Charry Sébastien, Daufouy Jérôme, Dolmaire Claire, Garnier Matthieu, Le Deuff Maxime, Mryankov Hristo, Prud'homme Sébastien, Tavares Vanden Berghe Brícia, Venzal Vincent, Wolny Philippe: *AIA LE PISÉ: Mieux concevoir & construire en terre crue*. Guide pédagogique, Janvier 2023. Consulté le 15 Octobre 2024.

[4] Bioul Sophie: *Principes techniques généraux de conception architecturale en terre crue en Île-de-France*. Mémoire, Novembre 2020. Consulté le 12 Novembre 2024.

[5] Champiré Florient, Fabbri Antonin, Heitz Philippe, Meunier Nicolas, Morel Jean-Claude, Soudani Lucile: *L'isolation du pisé: pertinence et principes*. Août 2015. Consulté le 12 Novembre 2024.

[6] Chassaing Jean-Paul, Chauveau Jean-Claude: *Introduction à la méthode de plans d'expériences par la méthode Taguchi*. Consulté le 3 Décembre 2024.

[7] Girerd Manon: *L'isolation thermique des murs en pisé par l'extérieur avec des matériaux bio et/ou géo sourcés: état des lieux de la pratique professionnelle actuelle et analyse des solutions techniques*. Thèse, Février 2024. Disponible à : `https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04472910`. Consulté le 15 Octobre 2024.

[8] Girerd Monon, Ple Olivier, Prime Noémie: *Analyse bibliographique préliminaire à l'étude du Comportement multifonctionnel de Parois Complexes géo et bio-Sourcées (ANR PACS+)*. Thèse, Juin 2024. Disponible à : `https://hal.science/hal-04593633`. Consulté le 15 Octobre 2024.

[9] Ministère de la transition écologique: *Guide RE2020*. Janvier 2024. Consulté le 10 Décembre 2024.

[10] Moya Jean-Pierre: *Un mur massif doit-il être isolé? Le fonctionnement de la façade sud*. Dossier, mars 2019. Consulté le 15 Octobre 2024.

[11] LGCB-ENTPE: *L'isolation du pisé: pertinence et principes*. Août 2015. Consulté le 1 Avril 2025.

[12] Quadco' engineering: *Définition PMV/PPD*. Consulté le 4 Avril 2025.

Apéndice A

Organización temporal del proyecto: GANTT

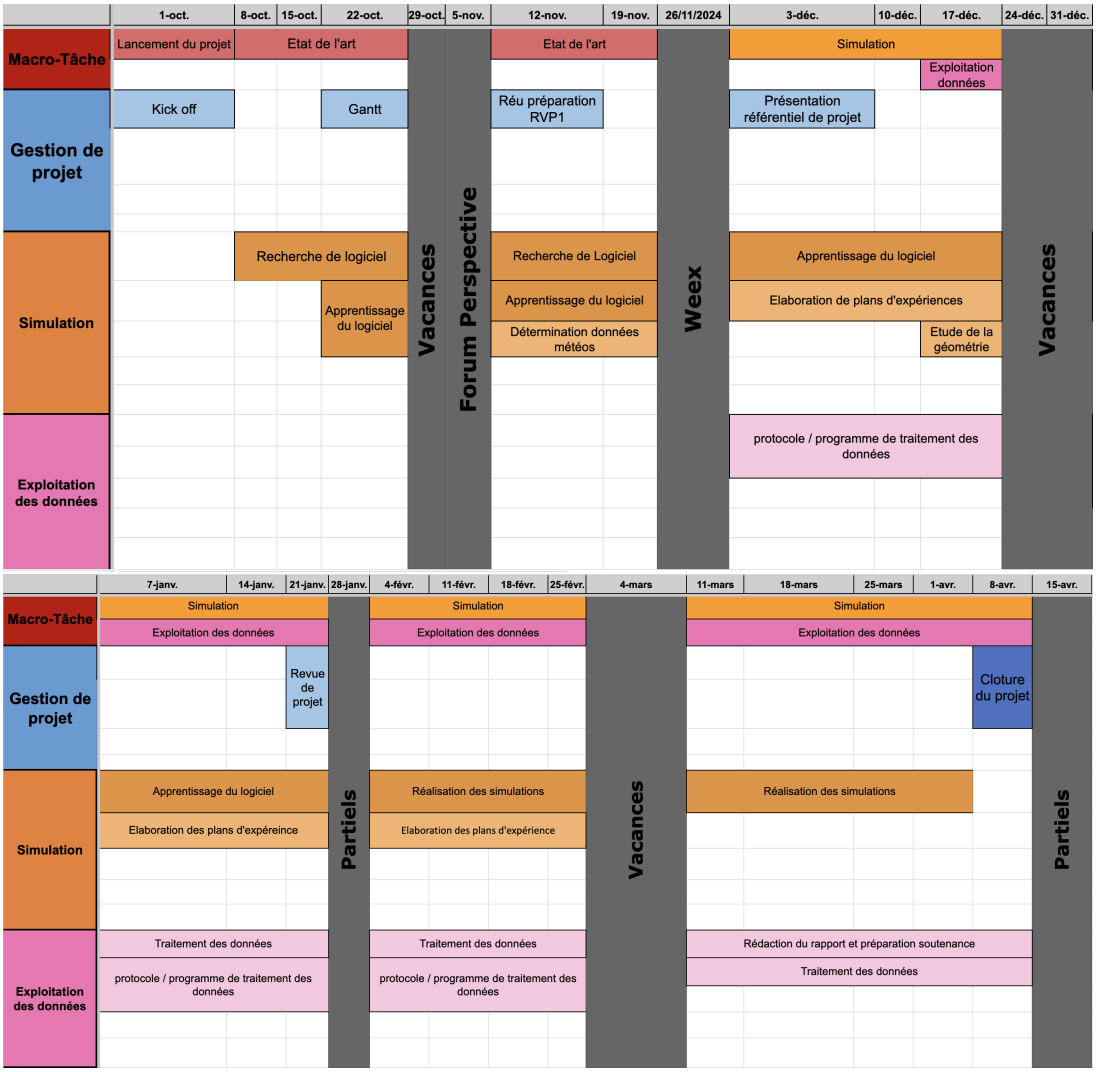


Figura A.1: GANTT

Elaboración propia

Columna izquierda (categorías):

- Macro-Tarea
- Gestión del proyecto
- Simulación
- Explotación de los datos

Semana del 1 al 8 de octubre:

- Lanzamiento del proyecto
- *Kick off* → Reunión inicial

Semana del 8 al 15 de octubre:

- *État de l'art* → Estado del arte
- Diagrama de Gantt

Semana del 15 al 29 de octubre:

- *Recherche de logiciel* → Búsqueda de software
- *Apprentissage du logiciel* → Aprendizaje del software

Semana del 29 de octubre al 5 de noviembre:

- *Vacances Forum Perspective* → Vacaciones

Semana del 5 al 19 de noviembre:

- Reunión de preparación para RVP1
- Búsqueda de software
- Aprendizaje del software
- *Détermination données météos* → Determinación de datos meteorológicos

Semana del 26 de noviembre:

- *Présentation référentiel de projet* → Presentación del marco de referencia del proyecto

Semanas del 3 al 17 de diciembre:

- Simulación
- Aprendizaje del software
- Elaboración de planes de experimentación
- Estudio de la geometría
- Protocolo / programa de tratamiento de datos

Semana del 10 al 17 de diciembre:

- Explotación de los datos

Semana del 24 de diciembre en adelante:

- Vacaciones

Semana del 7 al 14 de enero:

- Simulación
- Explotación de datos

Semana del 14 al 21 de enero:

- Aprendizaje del software
- Elaboración de planes de experimentación
- Tratamiento de los datos
- Protocolo / programa de tratamiento de datos

Semana del 21 al 28 de enero:

- *Revue de projet* → Revisión del proyecto

Semanas del 4 al 25 de febrero:

- *Simulation* → Simulación

- *Exploitation des données* → Explotación de datos
- *Réalisation des simulations* → Realización de simulaciones
- *Élaboration des plans d'expérience* → Elaboración de planes de experimentación
- *Traitement des données* → Tratamiento de datos
- *Protocole / programme de traitement des données* → Protocolo / programa de tratamiento de datos

Semana del 4 al 11 de marzo:

- *Vacances* → Vacaciones

Semana del 11 al 25 de marzo:

- *Simulation* → Simulación
- *Exploitation des données* → Explotación de datos
- *Réalisation des simulations* → Realización de simulaciones
- *Rédaction du rapport et préparation soutenance* → Redacción del informe y preparación de la defensa
- *Traitement des données* → Tratamiento de datos

Semana del 1 al 15 de abril:

- *Clôture du projet* → Cierre del proyecto

Apéndice B

Propiedades térmicas y físicas de los materiales de tierra cruda

Tabla B.1: Propiedades térmicas y físicas de los materiales de tierra cruda (1/4)

Elaboración propia

Materiales	Densidad seca (kg/m^3)	Resistencia a compresión (MPa)	c (J/kg·K)	Capacidad térmica volumétrica (kJ/m^3·K)
Tapia	1700 a 2200	0,9 a 1,7	1000 a 1800	1700 a 3960
Bauge	1400 a 1800	0,6 a 1,5	800 a 1000	400 a 750
Adobe	1400 a 2200	0,6 a 2,0	1000 a 1500	1400 a 3300
BTC	1800 a 2100	2 a 4	800 a 1000	1440 a 2100

Tabla B.2: Propiedades térmicas y físicas de los materiales de tierra cruda (2/4)

Elaboración propia

Materiales	Conductividad térmica (W/m·K)	Difusividad térmica (m^2/s)	Efusividad térmica (W·h$^{1/2}$/m^2·K)	μ
Tapia	0,46 a 0,81	0,25 a 0,27 $\times 10^{-6}$	15 a 27	4 a 10 (kg/m^2·h^{0,5})
Bauge	0,4 a 1	0,26 a 0,28	12 a 21	4 a 10 (W)
Adobe	0,4 a 0,6	0,22 a 0,28 $\times 10^{-6}$	12 a 21	5 a 10 (kg/m^2·h^{0,5})
BTC	0,6 a 0,8	0,22 a 0,28 $\times 10^{-6}$	28,2	4 a 10 (kg/m^2·h^{0,5})

Tabla B.3: Propiedades térmicas y físicas de los materiales de tierra cruda (3/4)

Elaboración propia

Materiales	Densidad seca (kg/m^3)	c (J/kg·K)	Capacidad térmica volumétrica (kJ/m^3·K)	λ (W/m·K)
Torchis	600 a 1800	830 a 1600	498 a 2880	0,40 a 0,50
Tierra aligerada	200 a 1200	700/900	140 a 1080	0,4 a 0,47
Revestimiento	1300 a 1550	800/1000	1000 C	0,3 a 0,6

Tabla B.4: Propiedades térmicas y físicas de los materiales de tierra cruda (4/4)

Elaboración propia

Materiales	Efusividad térmica	μ	Coeficiente de absorción de agua (W)	Aislamiento de muro o suelo (dB)
Torchis	20 a 77	3 a 12	-	40 a 56 (10 a 25 cm de espesor)
Tierra aligerada	-	4 a 5	-	40 a 57 (10 a 35 cm de espesor)
Revestimiento	-	8	6 a 13	-

Apéndice C

Valores de los parámetros dados por el plan de experiencia para las simulaciones

ρ_m (kg/mˆ3)	c_m (J/kg.K)	λ_m $W/m.K$	e (cm)	ρ_i(kg/m^3)	c$_i$$J/kg.K$	λ_i W/m.K	e$_i$(cm)
1400	1085.71	0.294694	60	153.469	1214.29	0.0360816	27.2449
1412.24	1493.88	0.177143	26.5306	134.082	1442.86	0.037551	21.4286
1424.49	1310.2	0.980408	50.2041	64.2857	1357.14	0.0380408	17.1429
1436.73	861.224	0.647347	29.7959	41.0204	1528.57	0.0316735	17.7551
1448.98	1228.57	0.804082	33.8776	83.6735	2042.86	0.0382857	29.3878
1461.22	1800	0.47102	55.9184	87.551	1614.29	0.0348571	22.0408
1473.47	1534.69	0.137959	44.4898	48.7755	1300	0.0297143	15.6122
1485.71	1636.73	0.56898	32.2449	95.3061	1271.43	0.0321633	26.0204
1497.96	983.673	0.510204	28.1633	44.898	1242.86	0.0333878	25.7143
1510.2	1657.14	0.921633	41.2245	114.694	757.143	0.0341224	28.7755
1522.45	1412.24	0.941224	20.8163	157.347	1700	0.0306939	18.0612
1534.69	1289.8	0.333878	37.9592	33.2653	700	0.0397551	23.8776
1546.94	1146.94	0.549388	39.5918	180.612	1757.14	0.0287347	27.8571
1559.18	1208.16	0.608163	54.2857	165.102	2014.29	0.0302041	18.3673
1571.43	1248.98	0.823673	57.551	17.7551	1557.14	0.0282449	26.6327
1583.67	963.265	0.353469	24.898	141.837	1728.57	0.0392653	18.6735
1595.92	1432.65	0.862857	33.0612	200	1157.14	0.0370612	22.3469
1608.16	1024.49	0.157551	51.0204	13.8776	1900	0.0390204	20.2041
1620.41	1718.37	0.529796	51.8367	126.327	1985.71	0.0343673	24.1837
1632.65	1575.51	0.373061	20	106.939	842.857	0.0284898	21.7347
1644.9	1044.9	0.04	46.9388	161.224	1185.71	0.035102	16.2245
1657.14	922.449	0.0595918	37.1429	72.0408	1785.71	0.030449	28.1633
1669.39	1269.39	0.882449	53.4694	137.959	985.714	0.0292245	15.9184
1681.63	1595.92	0.412245	45.3061	188.367	728.571	0.0368163	16.8367
1693.88	820.408	0.843265	30.6122	130.204	928.571	0.0385306	20.8163
1706.12	942.857	0.196735	47.7551	56.5306	785.714	0.0309388	25.4082
1718.37	840.816	0.275102	46.1224	172.857	1642.86	0.0319184	17.449
1730.61	1514.29	0.78449	31.4286	10	1585.71	0.0331429	20.5102
1742.86	1126.53	0.235918	23.2653	184.49	900	0.0353469	29.6939
1755.1	800	0.490612	49.3878	79.7959	814.286	0.0324082	18.9796
1767.35	1779.59	0.118367	38.7755	21.6327	1328.57	0.0336327	30
1779.59	1697.96	0.0791837	28.9796	196.122	1842.86	0.0314286	21.1224
1791.84	1351.02	0.725714	42.8571	149.592	2071.43	0.0387755	15
1804.08	881.633	0.764898	58.3673	91.4286	1500	0.0363265	25.102
1816.33	1065.31	1	48.5714	192.245	1414.29	0.0346122	26.3265
1828.57	1453.06	0.392653	55.102	145.714	871.429	0.0289796	27.551
1840.82	1738.78	0.745306	21.6327	99.1837	1385.71	0.04	23.2653
1853.06	1391.84	0.314286	22.449	68.1633	1814.29	0.0373061	23.5714
1865.31	1106.12	0.902041	25.7143	29.3878	1014.29	0.032898	28.4694

ρ_m (kg/m^3)	c_m (J/kg.K)	λ_m $W/m.K$	e (cm)	ρ_i(kg/m^3)	c$_i$$J/kg.K$	λ_i W/m.K	e$_i$(cm)
1877.55	1187.76	0.666939	34.6939	25.5102	2100	0.0326531	19.2857
1889.8	1677.55	0.706122	42.0408	52.6531	1128.57	0.0338776	15.3061
1902.04	1759.18	0.960816	40.4082	122.449	1957.14	0.0311837	26.9388
1914.29	1473.47	0.25551	52.6531	118.571	1671.43	0.0395102	24.7959
1926.53	1330.61	0.686531	59.1837	37.1429	957.143	0.0377959	22.6531
1938.78	1167.35	0.0987755	24.0816	60.4082	1071.43	0.0355918	16.5306
1951.02	1616.33	0.431837	43.6735	176.735	1100	0.0365714	24.4898
1963.27	1555.1	0.588571	36.3265	110.816	1042.86	0.028	22.9592
1975.51	1371.43	0.216327	56.7347	75.9184	1871.43	0.0294694	19.898
1987.76	1004.08	0.451429	35.5102	103.061	1928.57	0.0358367	29.0816

Elaboración propia

Apéndice D

Código Python para trazar las curvas

D.1. Código principal

```
from data_kozibu import select_plot_kzb
from data_pleaides import select_plot_pld

full_range = ["01/01/2024 00:00","31/12/2024 23:59"]

select_plot_kzb(["05/07/2024 00:00","07/07/2024 00:00"],"sud_ext_rennes.txt",
                PMV=False, PPD=False, T_e=False, T_int=False,
                T_wall_north=True, T_wall_east=True,
                T_wall_south=True, T_wall_west=True)

select_plot_pld(["01/01/2024 00:00","31/12/2024 23:59"], 'Ajaccio_iso_int',
                Tint=True, T_ext=True, PMV=False, PPD=False)
```

Listing D.1: Código para trazar los datos de Kozibu y Pléiades

D.2. Código para extraer los datos de Kozibu

```
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import os
import numpy as np
from matplotlib.ticker import MaxNLocator

# Sélection du dossier contenant les fichiers de simulation
folder_path = "res_pleaides_rennes/"
nb_variables = 6
nb_variables_confort = 3
files = [f for f in os.listdir(folder_path) if f.endswith('.txt')]
files = sorted(files, key=lambda x: x.startswith("PP"))

# Création d'un dictionnaire pour stocker les données
dataframe = {}
file_groups = {}

for file in files:
```

```
    file_path = os.path.join(folder_path, file)

    if file.startswith("PP_"):
        base_name = file[3:]  # Supprime le préfixe "PP_"
        file_groups.setdefault(base_name, {})["PP"] = file_path
    else:
        file_groups.setdefault(file, {})["X"] = file_path

for base_name, paths in file_groups.items():
    df_list = []

    # Lecture du fichier X s'il existe
    if "X" in paths:
        df_x = pd.read_csv(paths["X"], sep='\t', header=None, encoding='
            ISO-8859-1')
        df_x = df_x.iloc[:, :nb_variables + 1]
        df_list.append(df_x)

    # Lecture du fichier PP_X s'il existe
    if "PP" in paths:
        df_pp = pd.read_csv(paths["PP"], sep='\t', header=None, encoding
            ='ISO-8859-1')
        df_pp = df_pp.iloc[:, 1:nb_variables_confort + 1]
        df_list.append(df_pp)

    # Fusion des DataFrames
    if df_list:
        df_merged = pd.concat(df_list, axis=1)
        dataframe[base_name] = df_merged

# Sélection des données et conversion du format des dates
f = files[0]
data = dataframe[str(f)]
time = data.iloc[:, 0].tolist()[1:]
dates_extracted = [date.split("␣", 1)[1] for date in time][:len(time)]
time = [date.replace('0001','2024') if '0001' in date else date.replace(
    '0002','2025') for date in dates_extracted]
dates = pd.to_datetime(time, format='%d/%m/%Y␣%H:%M')

# Extraction des températures
T_ext = [float(i.replace(",", ".").strip()) for i in data.iloc[:, 1].
    tolist()[1:]]
temperatures = {"T_ext": T_ext}

# Extraction des données pour chaque profil
for key, value in dataframe.items():
    if key not in temperatures:
        temperatures[key] = {}

    T_int = [float(i.replace(",", ".").strip()) for i in value.iloc[:,
        2].tolist()[1:]]
    T_wall_N = [float(i.replace(",", ".").strip()) for i in value.iloc
        [:, 3].tolist()[1:]]
    T_wall_S = [float(i.replace(",", ".").strip()) for i in value.iloc
        [:, 4].tolist()[1:]]
    T_wall_E = [float(i.replace(",", ".").strip()) for i in value.iloc
        [:, 5].tolist()[1:]]
```

```
    T_wall_W = [float(i.replace(",", ".").strip()) for i in value.iloc
        [:, 6].tolist()[1:]]
    PPD = [float(i.replace(",", ".").strip()) for i in value.iloc[:, 7].
        tolist()[1:]]
    PMV_max = [float(i.replace(",", ".").strip()) for i in value.iloc[:,
         8].tolist()[1:]]
    PMV_min = [float(i.replace(",", ".").strip()) for i in value.iloc[:,
         9].tolist()[1:]]

    PMV = [(PMV_max[i] + PMV_min[i]) / 2 for i in range(len(PMV_max))]

    temperatures[key]["T_int"] = T_int
    temperatures[key]["T_wall_north"] = T_wall_N
    temperatures[key]["T_wall_south"] = T_wall_S
    temperatures[key]["T_wall_east"] = T_wall_E
    temperatures[key]["T_wall_west"] = T_wall_W
    temperatures[key]["PPD"] = PPD
    temperatures[key]["PMV_max"] = PMV_max
    temperatures[key]["PMV_min"] = PMV_min
    temperatures[key]["PMV"] = PMV
    temperatures[key]["T_max"] = max(T_int)
    temperatures[key]["T_min"] = min(T_int)
    temperatures[key]["T_avg"] = round(np.mean(T_int), 2)

# Fonction pour tracer les données
def select_plot_kzb(IT, *args, T_e=True, **kwargs):
    start_date = pd.to_datetime(IT[0], format='%d/%m/%Y %H:%M')
    end_date = pd.to_datetime(IT[1], format='%d/%m/%Y %H:%M')

    mask = (dates >= start_date) & (dates <= end_date)
    selected_indices = np.where(mask)[0]
    T0, Tf = selected_indices[0], selected_indices[-1]

    if T_e:
        plt.plot(dates[mask], T_ext[T0:Tf+1], label='T ext')

    for profile in args:
        for key, value in kwargs.items():
            if value:
                T = temperatures[profile][str(key)][T0:Tf+1]
                label = profile.split(".", 1)[0]
                plt.plot(dates[mask], T, label=f"{label}:{key}")

    plt.gca().yaxis.set_major_locator(MaxNLocator(nbins=10))
    plt.xticks(rotation=20)
    plt.legend()
    plt.xlabel('Temps')
    plt.ylabel('Température [C]')
    plt.grid()
    plt.show()
```

Listing D.2: Tratamiento de los datos de Kozibu y Pléiades

D.3. Código para extraer los datos de Pléiades

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
import pandas as pd
import os
import numpy as np
from matplotlib.ticker import MaxNLocator

# Sélection du dossier contenant les fichiers CSV
dossier = "Configurations/"
data_dict = {}   # Dictionnaire principal

# Chargement des fichiers CSV dans un dictionnaire
for fichier in os.listdir(dossier):
    if fichier.endswith(".csv"):  # Filtre les fichiers CSV
        chemin_fichier = os.path.join(dossier, fichier)
        df = pd.read_csv(chemin_fichier, sep=';')  # Chargement du
            fichier CSV

        # Stocke chaque fichier sous forme de dictionnaire
        nom_fichier_sans_extension = os.path.splitext(fichier)[0]
        data_dict[nom_fichier_sans_extension] = df.to_dict(orient="list"
            )

# Création des dates
dates = []
file_sample = data_dict[list(data_dict.keys())[0]]  # Sélectionne un
    fichier pour obtenir les dates

for j in range(1, len(file_sample['heure'])):
    if int(file_sample['heure'][j]) == 24:
        dates.append(f"{int(file_sample['jour'][j])}/{int(file_sample['
            mois'][j])}/2024 23:59")
    else:
        dates.append(f"{int(file_sample['jour'][j])}/{int(file_sample['
            mois'][j])}/2024 {int(file_sample['heure'][j])}:00")

time = pd.to_datetime(dates, format='%d/%m/%Y %H:%M')

# Fonction pour tracer les données
def select_plot_pld(IT, *args, T_ext=True, **kwargs):
    """
    - IT : Intervalle temporel sous forme de liste ["jj/mm/yyyy HH:MM",
    "jj/mm/yyyy HH:MM"]
    - args : Profils à afficher
    - kwargs : Données à tracer pour chaque profil
    - T_ext : Température extérieure (affichée par défaut, mettre False
    pour la cacher)

    Exemple :
    select_plot_pld(["01/01/2024 00:00","31/12/2024 23:59"], 'profil1',
    'profil2', PPD=True)
    """

    # Sélection des dates
    start_date = pd.to_datetime(IT[0], format='%d/%m/%Y %H:%M')
    end_date = pd.to_datetime(IT[1], format='%d/%m/%Y %H:%M')

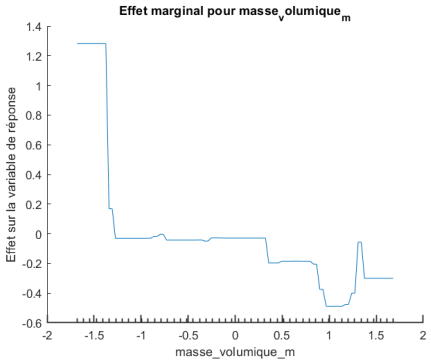
    mask = (time >= start_date) & (time <= end_date)
    selected_indices = np.where(mask)[0]
    T0, Tf = selected_indices[0], selected_indices[-1]
```

```
52
53      if T_ext:
54          plt.plot(time[mask], file_sample["Text"][T0:Tf+1], label='T ext'
                )
55
56      for profile in args:  # Pour chaque profil choisi
57          for key, value in kwargs.items():  # Pour chaque donnée choisie
58              if value:
59                  T = data_dict[profile][str(key)][T0:Tf+1]
60                  label = f"{key} ({profile})"
61                  plt.plot(time[mask], T, label=label)
62
63      plt.gca().yaxis.set_major_locator(MaxNLocator(nbins=10))  # 3 ticks
            maximum
64      plt.xticks(rotation=20)
65      plt.legend()
66      plt.xlabel('Temps')
67      plt.ylabel('Température [C]')
68      plt.grid()
69      plt.show()
```

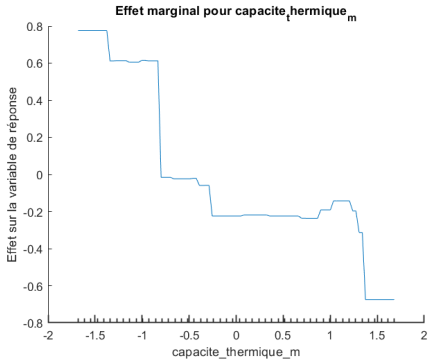
Listing D.3: Tratamiento de los ficheros CSV para Pléiades

Apéndice E

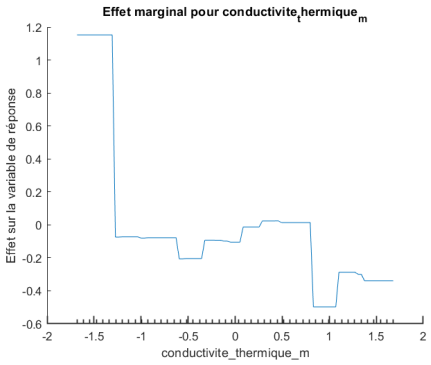
Variación del índice PPD en función de los diferentes parámetros físicos



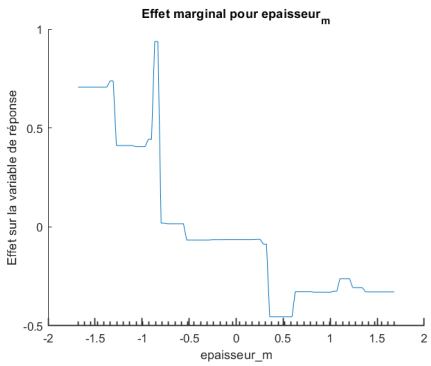
(a) Densidad del material



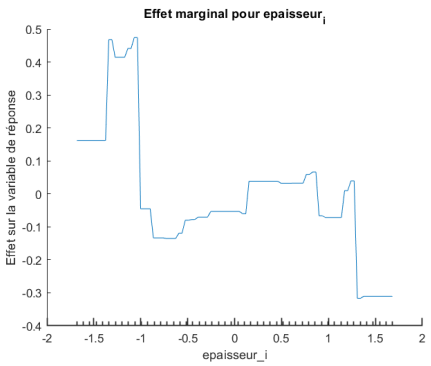
(b) Capacidad térmica del material



(c) Conductividad térmica del material



(d) Espesor del material



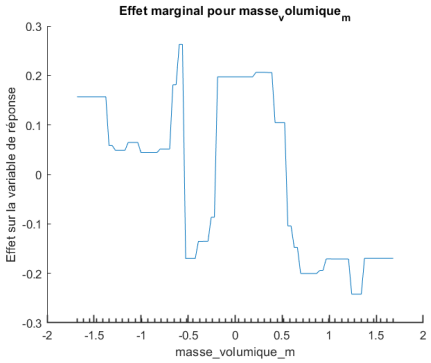
(e) Espesor del aislante

Figura E.1: Índice PPD en función de los parámetros significativos

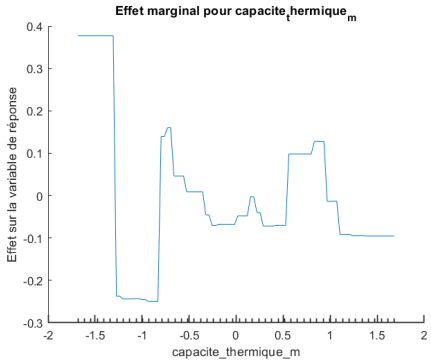
Elaboración propia

Apéndice F

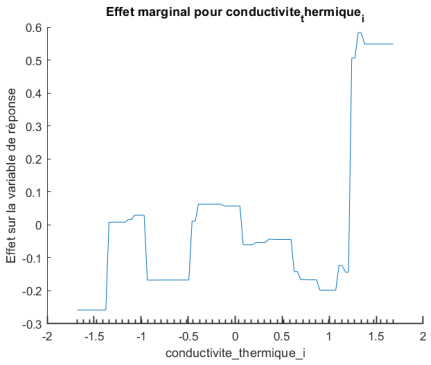
Variación del consumo en función de los diferentes parámetros físicos



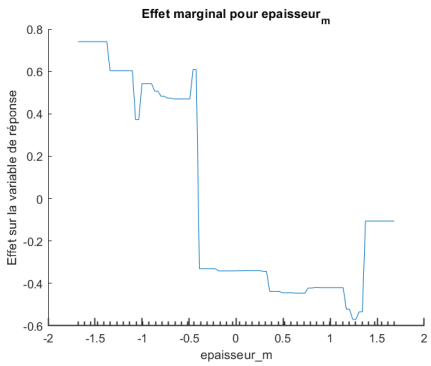
(a) Densidad del material



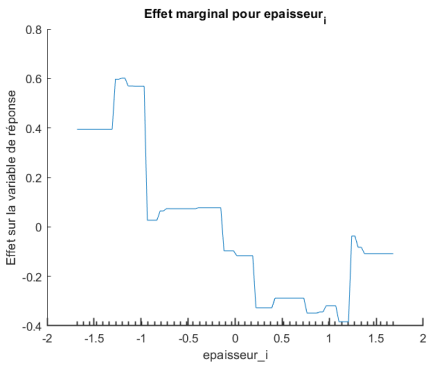
(b) Capacidad térmica del material



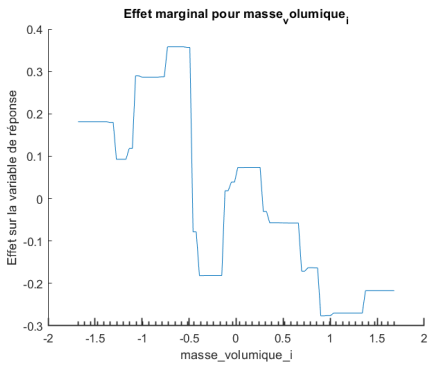
(c) Conductividad térmica del material



(d) Espesor del material



(e) Espesor del aislante



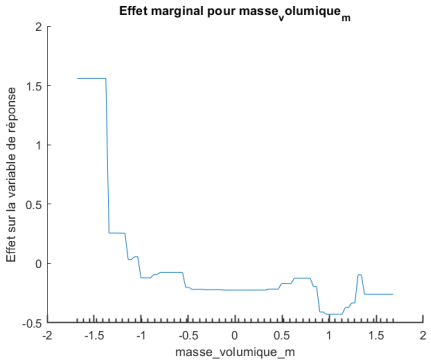
(f) Densidad del aislante

Figura F.1: Consumo en función de los parámetros significativos

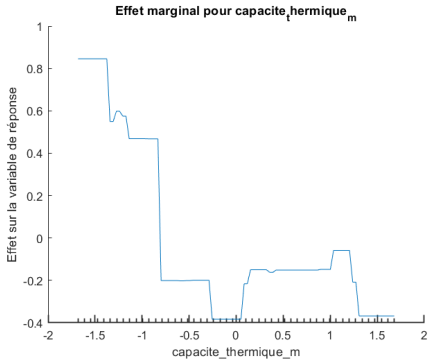
Elaboración propia

Apéndice G

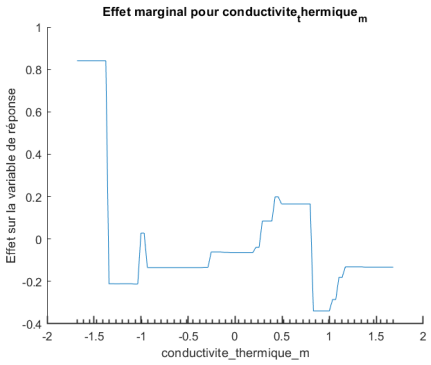
Variación del índice PMV en función de los diferentes parámetros físicos



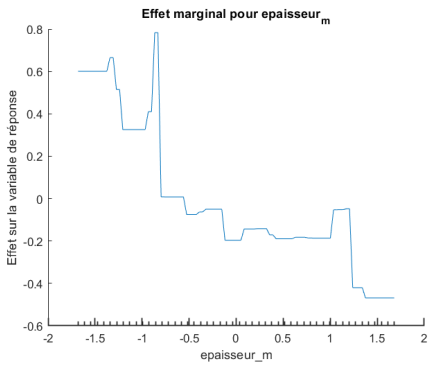
(a) Densidad del material



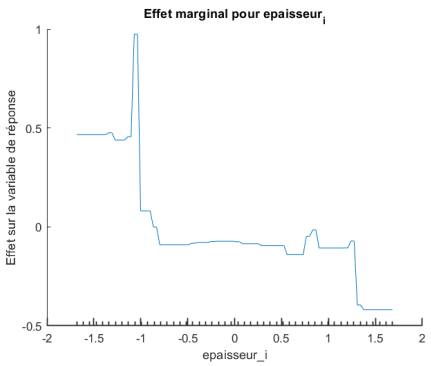
(b) Capacidad térmica del material



(c) Conductividad térmica del material



(d) Espesor del material



(e) Espesor del aislante

Figura G.1: Índice PMV en función de los parámetros significativos

Elaboración propia

Apéndice H

Tabla resumen de las características de los materiales para las simulaciones

Material	$\rho\ [kg \cdot m^{-3}]$	$c_p\ [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	$\lambda\ [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
Tapia	1885	1000	0.996
Lana de madera	140	2100	0.042
Corrector térmico	350	800	0.12
Hormigón	2300	920	1.75
Teja	1250	1000	0.46

Tabla H.1: Propiedades térmicas de los materiales

Elaboración propia

Apéndice I

Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Hoy en día, el sector de la construcción representa una parte importante del consumo energético mundial y de las emisiones de gases de efecto invernadero.

En el contexto actual de transición hacia una sociedad más sostenible, repensar los materiales y técnicas constructivas es clave para hacer frente a los desafíos ambientales, sociales y económicos que se nos presentan. Es en este marco que las Naciones Unidas desarrollaron y en 2015, adoptaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los cuales buscan guiar las transformaciones necesarias para afrontar dichos desafíos.

Este trabajo se alinea con varios de estos objetivos, ya que se inscribe en un contexto de transición energética y lucha contra el calentamiento global. La elección de materiales con bajo impacto ambiental, capaces de mejorar el confort sin depender de tecnologías activas, permite avanzar en la eficiencia energética dentro del sector de la construcción.

La **tierra cruda**, tradicionalmente utilizada en distintas culturas, resurge hoy como un recurso moderno y pertinente. No solo responde a criterios ecológicos, sino que también fortalece la economía local, promueve técnicas constructivas inclusivas y refuerza la identidad arquitectónica de cada territorio.

Además de requerir poca transformación industrial, la tierra cruda destaca por su versatilidad: ofrece un buen comportamiento higrotérmico, una gran inercia térmica y es reciclable.

Su uso puede contribuir directamente a alcanzar varios ODS, gracias a acciones concretas con un impacto medible tanto en el entorno como en la calidad de vida de las personas.

Así, el uso de materiales como la tierra cruda en la construcción se alinea directamente con varios **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)** establecidos por la ONU:

- **ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles.** Busca lograr que las ciudades sean inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. La construcción con tierra cruda, además de ser local y accesible, fomenta una arquitectura adaptada al entorno, con baja huella ecológica y mayor resiliencia frente a las condiciones climáticas extremas.

- **ODS 12: Producción y consumo responsables.** Promueve el uso eficiente de los recursos naturales y la reducción de residuos. La tierra cruda es un material reutilizable, reciclable y de bajo impacto ambiental, lo que la convierte en una alternativa coherente con modelos de producción más responsables y circulares.

- **ODS 13: Acción por el clima.** Impulsa medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Disminuir la dependencia de sistemas activos de climatización y optar por soluciones pasivas como la inercia térmica de la tierra cruda ayuda a reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero del sector de la construcción.